

RAPPORT D'ÉTUDE  
N°DRS-09-103165-05239A

14/09/2009

**Programme 181 – DRA91**

**Maîtrise des Risques 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

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



## **Programme 181 DRA 91 :**

### **Maîtrise des Risques 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

Grenoble (38)

Client : Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages  
(MEEDDM / DGPR / SRNH / STEEGBH / BETCGB)

#### Liste des contributeurs INERIS:

Christophe DUVAL, Ingénieur à la Direction des Risques de Sols et de Sous-sol  
Thibault BALOUIN, Ingénieur à la Direction des Risques Accidentels



## PREAMBULE

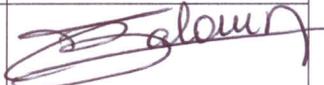
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

Page de validation			
Etat de l'art sur les méthodes existantes de cotation en gravité des accidents de barrages en termes de conséquences humaines			
Rédaction Initiale	Qualité	Date	Emargement
Christophe DUVAL	Ingénieur à l'Unité RNOS (DRS)	04/09/2009	
Dans le cadre de la procédure générale qualité de l'INERIS et en respect du paragraphe 4 du Manuel Qualité, ce document a fait l'objet de relectures et d'un contrôle par des vérificateurs			
Relecture	Qualité	Date	Emargement
Thibault BALOUIN	Ingénieur à l'unité DIAG (DRA)	07/09/2009	
Vérifications	Qualité	Date	Emargement
Frédéric MERLIER	Responsable de l'unité DIAG (DRA)	22/09/2009	
Jean-Bernard KAZMIERCZAK	Responsable de l'unité RNOS (DRS)	16/09/09	
Vérification finale	Qualité	Date	Emargement
Marie-Astrid KORDEK	Déléguée Appui à l'Administration (DRA)	28/09/09	
Approbation	Qualité	Date	Emargement
Sylvain CHAUMETTE	Responsable du Pôle AGIR (DRA)	30/09/09	

<b>Révision</b>	<b>Relecture</b>	<b>Application</b>	<b>Modifications</b>
Version 1	09/2009	09/2009	
Version 2			

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>7</b>
1.1 Contexte.....	7
1.2 Structure du projet DRA91 .....	7
1.3 Présentation de l'opération B .....	7
1.4 Objet et structure du présent document .....	8
1.5 Liste des principales abréviations utilisées dans ce rapport.....	8
<b>2. ASPECTS GENERAUX SUR LES METHODES EXISTANTES.....</b>	<b>9</b>
2.1 Résultats donnés par les méthodes .....	9
2.2 Paramètres de calcul des modèles .....	10
2.3 Modèles d'estimation.....	11
2.4 Organisation de la suite du rapport .....	12
<b>3. METHODES NON SPECIFIQUES AUX BARRAGES.....</b>	<b>13</b>
3.1 Friedman, 1975, USA (catastrophes naturelles) .....	13
3.2 Petak and Atkisson, USA 1982 (catastrophes naturelles) .....	14
3.3 Waarts, 1992, Pays-Bas (inondations côtières et fluviales).....	14
3.4 Vrouwenvelder and Steenhuis, 1997, Pays-Bas (inondations côtières et fluviales) .....	15
3.5 Central Disaster Management Council, 2003, Japon (Tsunamis) .....	15
3.6 Mizutani, 1985, Japon (Typhons) .....	16
3.7 Boyd 2005, Boyd et al, 2005, USA (Ouragans, Inondations) .....	16
3.8 Zhai et Al, 2006, Japon (Inondations) .....	16
3.9 Meeddm (ex Medad), 2006, France (Inondation) .....	17
3.10 Meeddm (ex Medad), 2006, France (Installations Classées AS) .....	18
3.11 Tsuchiya et Kawata, 1981, Japon, (Typhons) .....	19
3.12 Tableau synthétique des méthodes non spécifiques aux barrages.....	20
<b>4. METHODES SPECIFIQUES AUX BARRAGES S'ARRETANT A LA DETERMINATION DE LA POPULATION POTENTIELLEMENT IMPACTEE .....</b>	<b>21</b>
4.1 ANCOLD, 2000, Australie .....	21
4.2 Queensland Government, 2002, Australie .....	22

<b>5. METHODES SPECIFIQUES AUX BARRAGES BASEES SUR UN MODELE EMPIRIQUE.....</b>	<b>23</b>
5.1 Ayyaswamy et Al, 1974, USA.....	23
5.2 McCann et Al, 1985-1986 : Stanford/FEMA Model, USA .....	23
5.3 Paté-Cornell and Tagaras, 1986, USA.....	24
5.4 Méthode de GRAHAM 1999 (+ modèles dérivés), USA.....	24
5.5 Ramsbottom et al, 2003, 2004, DEFRA, Royaume Uni [26].....	31
<b>6. METHODES BASEES SUR UN MODELE CONCEPTUEL SPECIFIQUE AUX BARRAGES .....</b>	<b>33</b>
6.1 Life Safety Model .....	33
6.2 Life Sim .....	35
<b>7. SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS PAR RAPPORT A LA PROBLEMATIQUE EDD .....</b>	<b>39</b>
7.1 Moyens à mettre en œuvre et qualité de l'estimation.....	39
7.2 Synthèse et recommandations sur l'estimation de la PAR.....	41
<b>8. CONCLUSION.....</b>	<b>45</b>
<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>47</b>

# **1. INTRODUCTION**

## **1.1 CONTEXTE**

Le décret n° 2007-1735 du 11/12/2007, relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques, est entré en vigueur le 01/01/2008. A l'instar des installations classées (IC), il introduit l'obligation d'une étude de dangers (EDD) pour certains barrages et digues. L'EDD « (...) *explicitite les niveaux des risques pris en compte, détaille les mesures aptes à les réduire et en précise les niveaux résiduels une fois mises en œuvre les mesures précitées* » (art. R. 214-116, extrait). Un « guide de lecture » des EDD barrages, à destination des services instructeurs en charge du contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques, a été diffusé par une circulaire du MEEDDM (ex MEEDDAT) datée du 31 octobre 2008.

## **1.2 STRUCTURE DU PROJET DRA91**

L'étude de dangers doit, de façon générale, constituer de la part de l'exploitation un engagement et une démonstration de la maîtrise des risques d'accidents majeurs. Le programme, qui a débuté en 2009, s'organise autour de 2 principales opérations :

- Opération A : Participation au groupe de travail (GT) national sur les EDD d'ouvrages hydrauliques ;
- Opération B : Accidents de barrages : Modes d'évaluation de la gravité.

## **1.3 PRESENTATION DE L'OPERATION B**

### **1.3.1 OBJECTIFS DE L'OPERATION B**

L'objectif premier de cette opération est de fournir à l'administration des références ainsi que des orientations techniques facilitant l'instruction des EDD relatives aux barrages de classes A et B pour lesquels une EDD est obligatoire, et notamment la cotation en gravité des conséquences d'accidents majeurs.

### **1.3.2 DESCRIPTIFS DES TRAVAUX MENES EN 2009**

Les travaux envisagés pour cette première année portent sur :

- la réalisation d'un état des lieux / état de l'art, bonnes pratiques et méthodes (en France et à l'international, utilisés pour les barrages ou dans d'autres domaines) avec intégration des conditions d'utilisation, hypothèses, nature des données d'entrée et limites des méthodes au regard des attentes en matières d'EDD pour les barrages en France ;
- l'intégration du retour des méthodes d'estimation de la gravité présentées dans les différentes EDD barrages remises aux Services Instructeurs et analysées par le GT.

## **1.4 OBJET ET STRUCTURE DU PRESENT DOCUMENT**

### **1.4.1 OBJET DU PRESENT RAPPORT**

Dans le cadre de l'application de la réglementation relative aux Etudes De Dangers pour les ouvrages hydrauliques, le BETCGB s'intéresse à l'estimation de la gravité des conséquences d'un accident lié à un ouvrage de retenue. Les conséquences de l'onde de submersion créée par la rupture d'un barrage ou initiée par l'arrivée massive de matériau dans le réservoir peuvent être dramatiques que ce soit au niveau des pertes humaines, des atteintes à l'environnement ou des pertes économiques. Des ondes de submersion moins importantes, consécutives par exemple à un dysfonctionnement au niveau des vannes doivent également être étudiées. L'article 8 de l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu indique que « la gravité des conséquences [doit être] évaluée en termes de victimes humaines potentielles et de dégâts aux biens ». Le présent rapport, en accord avec le BETCGB, se focalise dans un premier temps sur les méthodes existantes pour l'estimation des conséquences en terme humain. D'autre part, une liste de documents sur l'estimation des conséquences économiques est donnée en annexe B. Les atteintes environnementales ont quant à elles été peu étudiées, si ce n'est dans le cas spécifique des barrages miniers pour lesquels des produits toxiques sont contenus dans le réservoir.

### **1.4.2 ORGANISATION DU PRESENT RAPPORT**

Le premier chapitre introduit des aspects généraux sur les différentes méthodes existantes concernant le type de résultats obtenus, les paramètres d'entrée les plus répandus et les différentes catégories de modèles d'estimation qui existent. Il introduit également les quatre chapitres suivants où sont effectivement listées et décrites les différentes méthodes. Enfin, le dernier chapitre consiste à examiner les problèmes et les avantages de ces méthodes dans le cadre réglementaire français des EDD. Dans le texte, les références à la bibliographie (Annexe A) sont données entre crochets.

## **1.5 LISTE DES PRINCIPALES ABREVIATIONS UTILISEES DANS CE RAPPORT**

BETCGB	Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages
DRA	Direction des Risques Accidentels
DRS	Direction des Risques Sols / Sous-sols
EDD	Etude de dangers
GT	Groupe de Travail
INERIS	Institut National de l'Environnement industriel et des RISques
MEEDDM	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (Ex MEEDDAT ; Ex MEDAD)
PAR	Population At Risk (nombre de personnes potentiellement impactées – Population Assujettie au Risque)

## **2. ASPECTS GENERAUX SUR LES METHODES EXISTANTES**

De nombreuses méthodes d'estimation des conséquences en terme humain d'inondations ou de ruptures de barrage ont été développées depuis les années 1980 dans le monde entier. Les méthodes concernant les inondations, voire les raz de marée et les tsunamis, ont volontairement été englobées dans la réflexion afin de couvrir un plus grand champ d'investigation. Les travaux les plus nombreux et les plus aboutis sont certainement ceux entrepris aux Etats-Unis. Les autres pays impliqués dans cette problématique sont principalement la Hollande et le Japon. Les méthodes ont le plus souvent été développées soit par des services d'état, soit par des universitaires et plus rarement par des industriels<sup>1</sup>.

Cette partie donne des premières informations sur les différentes catégories de méthodes qui existent et définit les termes nécessaires à une lecture aisée du rapport. Les points abordés concernent les résultats fournis par les différentes méthodes, les paramètres d'entrée et les types d'estimation.

**Dans la suite du texte le terme *méthode* fera référence à l'ensemble des étapes nécessaires à l'obtention du résultat à partir des paramètres d'entrée. Le terme *modèle* renvoie quant à lui à l'étape de calcul.**

### **2.1 RESULTATS DONNES PAR LES METHODES**

Il est très important de bien comprendre ce que fournit chaque méthode en termes de résultats. Quatre cas peuvent être différenciés :

- les méthodes qui donnent une estimation du nombre de personnes potentiellement impactées (ou exposées au sens de la circulaire DPPR/SE12/CB-06-0388 du 28/12/06). Cet indice, que l'on retrouvera fréquemment, se traduit par *Population At Risk* en anglais et l'abréviation *PAR* sera utilisée dans la suite du rapport ;
- les méthodes dans lesquelles l'estimation de la PAR ne constitue qu'une étape et qui fournissent au final une estimation du nombre de morts (souvent noté N dans le texte) ;
- les méthodes qui fournissent comme résultat une estimation du pourcentage de morts (souvent noté P dans le texte) au sein de la PAR sans que la façon de déterminer la PAR ne soit renseignée ;
- les méthodes qui donnent une estimation du nombre de morts sans avoir recours à l'estimation de la PAR.

De manière générale, l'estimation peut être une valeur, un intervalle, ou pour les méthodes les plus compliquées, une distribution probabiliste sur un intervalle de valeurs. Parmi toutes les méthodes, peu nombreuses sont celles qui s'intéressent aux blessés.

---

<sup>1</sup> Une seule méthode sponsorisée par un industriel a été trouvée mais il est possible que d'autres industriels aient développé des méthodes qui ne sont pas divulguées en externe.

## 2.2 PARAMETRES DE CALCUL DES MODELES

Le problème posé est un problème complexe pour plusieurs raisons :

- tout d'abord, l'estimation fait appel à de nombreux paramètres. Certains auteurs [2.1] ont ainsi identifié plus de 90 paramètres<sup>2</sup> susceptibles d'influencer le résultat ;
- certains des paramètres sont immuables dans le temps tandis que d'autres peuvent varier de manière déterminante pour le résultat. Dans le cas du calcul de la PAR, les variations saisonnières, hebdomadaires et journalières peuvent faire l'objet de scénarios temporels différents ;
- enfin, outre les paramètres physiques relatifs à l'onde de submersion (hauteur, vitesse, etc), il faut également tenir compte de paramètres humains et organisationnels pour lesquels l'estimation s'avère plus difficile. Certains modèles tentent ainsi de prendre en compte la conscience qu'a la population du danger lié à la rupture d'un barrage, ce qui pourra conditionner l'efficacité des dispositifs d'alerte et d'évacuation.

Les paramètres les plus usités dans les modèles sont la PAR (qui peut parfois être le résultat), la hauteur d'eau, le temps d'alerte et la position de la PAR par rapport au barrage. Dans les modèles les plus fins, l'estimation de la PAR et sa décomposition en groupes homogènes est un des points les plus soignés. Les définitions de ces paramètres varient parfois d'un modèle à l'autre et sont même rarement explicitées. De manière générale on peut proposer les définitions suivantes pour les paramètres les plus usités :

- PAR : population à risque obtenue en croisant une carte de la population et la carte d'inondation. Des critères supplémentaires sont souvent utilisés pour augmenter la précision du comptage. Ainsi, certains modèles précisent la hauteur d'eau minimale à prendre en compte avant de réaliser le croisement entre les cartes. Une autre pratique est de procéder à plusieurs comptages selon un découpage temporel (en fonction de la saison, de l'heure dans la journée, etc) ;
- Hauteur d'eau : Dans le cas des ruptures de barrages, la hauteur d'eau considérée est le plus souvent la hauteur maximale de l'onde qui résulte de la rupture. Dans le cas des inondations, il s'agit également du niveau d'eau maximal atteint avant la décrue ;
- Temps d'alerte : plusieurs définitions sont utilisées pour le temps d'alerte. Ainsi dans certains modèles, le temps d'alerte est l'intervalle de temps entre le début de la rupture et l'arrivée de l'eau dans la zone habitée. Dans d'autres modèles, le temps d'alerte est défini comme l'intervalle de temps entre l'alerte et la rupture du barrage.

---

<sup>2</sup> La liste des variables, proposée dans [2.1] est donnée en annexe D

## 2.3 MODELES D'ESTIMATION

Les différentes méthodes utilisent principalement deux types de modèles de quantification présentés schématiquement à la Figure 1. Il s'agit :

- de modèles empiriques, qui approchent le problème au niveau macroscopique. L'idée est d'essayer de lier le résultat (nombre de morts par exemple) à différents paramètres qui semblent a priori importants. De tels modèles s'appuient soit sur des données existantes, en utilisant des techniques statistiques, soit sur un jugement d'experts et le plus souvent sur les deux. Les arguments à l'encontre de l'établissement de tels modèles dans le cas des barrages sont le très faible nombre d'accidents connus, le fait que chaque barrage soit un cas unique et la détermination des paramètres pris en compte qui dépend fortement des paramètres effectivement renseignés dans les historiques ;
- de modèles conceptuels, qui approchent le problème à un niveau de détail plus fin. L'idée est de décomposer la problématique générale en plusieurs actions élémentaires pour lesquelles on définit des lois qui régissent les différentes variables. Par exemple, une loi peut être le critère de stabilité d'un être humain dans un flux d'eau caractérisé par la hauteur et la vitesse du fluide. Par rapport aux modèles empiriques, les modèles conceptuels utilisent donc plus de lois mais sont plus simples à calibrer. L'application de toutes ces règles sur un jeu de données initial se définit alors comme une simulation, qu'il est souvent plus commode de réaliser informatiquement et permet d'aboutir au résultat final. Pour l'utilisateur, ces modèles peuvent rapidement devenir des boîtes noires dont le fonctionnement n'est pas forcément transparent. Enfin, les modèles conceptuels demandent des moyens de développement et d'exploitation sans comparaison avec les modèles empiriques.

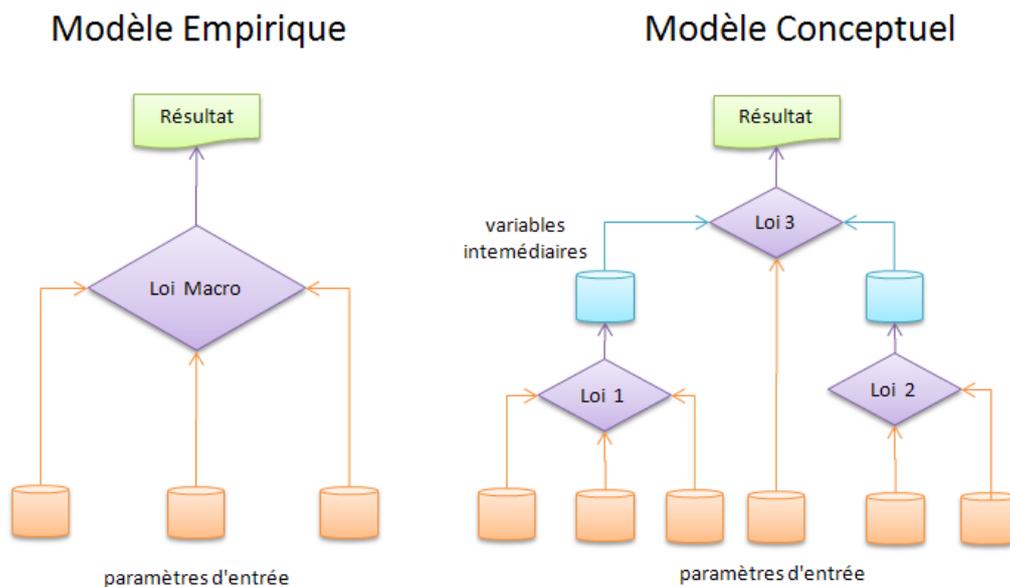


Figure 1 : Représentation schématique des modèles empiriques et conceptuels

## 2.4 ORGANISATION DE LA SUITE DU RAPPORT

Dans le troisième chapitre sont listées les méthodes non spécifiques aux barrages et qui ont été développées pour les raz de marée, pour les inondations consécutives aux ouragans, aux typhons et pour les inondations liées à des crues fluviales. Les méthodes spécifiques aux barrages sont présentées dans le quatrième chapitre lorsqu'elles s'arrêtent à la détermination de la PAR, dans le cinquième chapitre lorsqu'elles sont basées sur un modèle empirique et dans le sixième chapitre quand elles sont basées sur un modèle conceptuel.

Deux ouvrages présentent un référencement des méthodes existantes et ont servi de base à l'élaboration du présent rapport. Il s'agit de :

- Jonkman S.N. 2007. Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and applications. PhD Thesis. Delft University of Technology [4.5];
- McClelland, D.M., D.S. Bowles. 2002. Estimating life loss for dam safety risk assessment – a review and new approach, IWR report 02-R-3. 420 p.[2.1].

Certaines méthodes sont développées de manière plus approfondie directement à partir des documents sources.

### **3. METHODES NON SPECIFIQUES AUX BARRAGES**

Onze méthodes sont présentées dans ce chapitre et concernent principalement l'estimation des conséquences en terme humain suite à des inondations qu'elles soient liées à des précipitations trop fortes, à des cyclones (ouragans, typhons) ou à des tsunamis. La méthode d'estimation de la gravité d'un accident majeur dans une installation industrielle est intégrée dans ce chapitre et est décrite au paragraphe 3.10. Bien qu'assez éloignée de la thématique technique des barrages, elle est par contre intégrée dans un cadre réglementaire similaire et apporte donc des éléments de réflexion intéressants.

#### **3.1 FRIEDMAN, 1975, USA (CATASTROPHES NATURELLES)**

La méthode développée par Friedman, citée dans [2.1], ne concerne pas spécifiquement les ruptures de barrages mais toutes sortes de catastrophes naturelles. Dans le cadre des inondations, le produit de sortie de la méthode est le **nombre de morts** qui est directement relié au nombre de bâtiments impactés par la catastrophe par les lois suivantes :

- 1 mort pour 170 bâtiments d'habitation impactés pour une montée d'eau lente ;
- 1 mort pour 85 bâtiments d'habitation impactés pour une montée d'eau rapide.

Le modèle empirique est basé sur des statistiques de la Croix Rouge américaine mais nous n'avons pas eu accès au détail de la conception statistique du modèle. Celle-ci est probablement disponible dans la référence bibliographique [15].

La méthode indique également comment calculer la PAR en réalisant les étapes suivantes :

- Division de la plaine d'inondation en plusieurs zones homogènes en termes de hauteur d'eau et de période de retour ;
- Recensement du nombre de bâtiments d'habitation dans chaque zone et estimation de la PAR en comptant trois personnes par bâtiment (moyenne du recensement américain de 1970).

La méthode proposée par Friedman a l'avantage de se baser sur des informations qui sont accessibles, puisqu'il s'agit de la connaissance de la plaine d'inondation, de la répartition des bâtiments d'habitation dans cette plaine d'inondation et du nombre moyen de personnes dans une habitation. Le résultat est alors immédiat. L'inconvénient majeur de la méthode est le modèle statistique en lui-même, qui est basé sur des statistiques d'inondation et non de barrages et ne prend donc pas en compte l'effet dynamique de l'onde provoquée par la rupture d'un barrage. En effet, il est difficile de comparer l'impact sur un bâtiment d'une inondation, même rapide, à celui causé par une telle onde. Le terme « bâtiment impacté » et par conséquent le modèle développé sont donc difficilement transposable d'une problématique à l'autre.

### 3.2 PETAK AND ATKISSON, USA 1982 (CATASTROPHES NATURELLES)

Cette méthode, citée dans [2.1], n'est pas spécifique aux ruptures de barrages mais a été testée dans le cadre d'inondations. Les dommages structuraux sont considérés comme fondamentaux et le calcul du risque annuel se base sur trois lois :

- La distribution annuelle de l'intensité de l'inondation ;
- La vulnérabilité des bâtiments en fonction de l'intensité de l'inondation ;
- Le nombre de bâtiments impactés en fonction de l'intensité.

Le **nombre de morts** est ensuite estimé sur la base de 0.0956 morts par millions de dollars de dégâts matériels. Ce modèle empirique est basé sur des statistiques concernant des ouragans. Des informations complémentaires pourraient être trouvées dans la référence bibliographique [16].

Cette méthode semble assez peu adaptée à la problématique étudiée puisqu'elle nécessite auparavant d'estimer les dégâts matériels engendrés par la catastrophe, ce qui ajoute une étape de calcul qui n'est pas triviale. D'autre part, le modèle statistique proposé est spécifique aux ouragans qui sont des phénomènes météorologiques qui paraissent assez éloignés du phénomène de rupture de barrages et la transposition paraît donc difficile. Enfin, le fait de faire intervenir des coûts dans le modèle entraîne également une étape d'actualisation de la valeur de la monnaie.

### 3.3 WAARTS, 1992, PAYS-BAS (INONDATIONS COTIERES ET FLUVIALES)

Cette méthode, citée dans [4.5], comprend un modèle empirique basé sur des inondations désastreuses ayant causé 1835 morts en Hollande lors d'une tempête en Mer du Nord en 1953. Le résultat obtenu est le **pourcentage de morts (P)** au sein de la PAR en fonction de la hauteur d'eau (h) selon la relation suivante :

$$P = \frac{0.655}{1000} e^{116h}$$

La méthode de détermination de la PAR n'est pas explicitée. Les résultats s'appuient également sur les résultats trouvés par Duiser en 1989. La référence bibliographique [4.2], en néerlandais, pourrait apporter des informations supplémentaires sur la conception du modèle statistique.

L'avantage de cette méthode est qu'elle propose de lier le pourcentage de morts à une grandeur physique facile à déterminer qui est la hauteur d'eau. L'inconvénient réside principalement sur l'assise statistique du modèle est très spécifique et le modèle semble difficile à extrapoler à la problématique de rupture des barrages.

### 3.4 VROUWENVELDER AND STEENHUIS, 1997, PAYS-BAS (INONDATIONS COTIERES ET FLUVIALES)

Cette méthode, citée dans [4.5], est une extension de la méthode de Waarts et prend en compte un paramètre supplémentaire qui est la vitesse de montée des eaux ( $v_m$ ). **Le pourcentage de morts (P)** au sein de la PAR est alors donné en fonction de la hauteur d'eau ( $h$ ) et de la vitesse de montée des eaux ( $v_m$ ) selon les formules suivantes :

$$P = 0 \quad \text{si } h < 3 \text{ m ou si } v_m < 0.3 \text{ m.h}^{-1}$$

$$P = 1 \quad \text{si } h > 6.25 \text{ m et } v_m > 2 \text{ m.h}^{-1}$$

$$P = \min(\max(8.5e^{0.6h-6} - 0.15, 0) + \min(\max(8.5e^{12v_m-43} - 0.15, 0), 1), 1)$$

*dans les autres cas*

La méthode de détermination de la PAR n'est pas explicitée. La référence bibliographique [4.3], en néerlandais, pourrait apporter des informations supplémentaires sur la conception du modèle statistique.

Cette méthode est intéressante puisqu'elle s'appuie sur deux paramètres physiques qui sont intuitivement des paramètres majeurs du problème, la hauteur d'eau et la vitesse de montée des eaux. D'après [4.5], le fait que la mortalité soit nulle si la hauteur d'eau n'atteint pas 3 m quelque soit la vitesse de montée des eaux est par contre contradictoire avec les données recueillies pour les inondations côtières de 1953 en Hollande.

### 3.5 CENTRAL DISASTER MANAGEMENT COUNCIL, 2003, JAPON (TSUNAMIS)

Cette méthode, citée dans [4.5], a été développée pour estimer **le pourcentage P de morts** au sein de la PAR dans le cadre de tsunamis. Le modèle empirique, basé sur des données historiques japonaises, dépend de la hauteur de la vague du tsunami  $h_v$  selon la formule suivante :

$$P = 0.0282 e^{0.2328 h_v} \quad P \leq 1$$

La référence bibliographique [10], en japonais, pourrait apporter des informations supplémentaires sur la conception du modèle statistique et également sur des corrections qui ont a priori été proposées pour prendre en compte le temps d'arrivée, la conscience de la population et les effets d'évacuation et de l'alerte. Les ruptures de digues peuvent également être prises en compte .

La conception du modèle statistique n'est pas connue mis à part que le fait que les données sont relatives à des tsunamis. Comme dans le cas des ruptures de barrages, le phénomène redouté est donc une vague. Le paramètre retenu, la hauteur de la vague, est accessible et permet une utilisation aisée de la formule.

### 3.6 MIZUTANI, 1985, JAPON (TYPHONS)

L'auteur a proposé deux lois (citées dans [4.5]) en relation avec deux typhons qui permettent d'estimer le **pourcentage P de morts** au sein de la PAR en fonction de la hauteur d'eau moyenne h.

$$P = 10^{\left(\frac{2}{3}h - \frac{11}{3}\right)} \quad P \leq 1 \quad \text{Typhon Isswan}$$

$$P = 10^{(h-5.5)} \quad P \leq 1 \quad \text{Typhon Jans}$$

La référence bibliographique [12] pourrait apporter des informations supplémentaires sur la conception du modèle statistique. Les deux formules montrent néanmoins que les limites d'utilisation d'un modèle statistique sont très restreintes et qu'il n'est pas pertinent d'utiliser un modèle conçu sur la base d'un seul évènement en prédiction d'un autre évènement. L'extrapolation à des évènements différents comme une rupture de barrage ne semble pas pertinente.

### 3.7 BOYD 2005, BOYD ET AL, 2005, USA (OURAGANS, INONDATIONS)

Les auteurs ont proposé deux méthodes d'estimation du **pourcentage P de morts au sein de la PAR** en fonction de la hauteur d'eau h, citées dans [4.5]. La définition de h n'est pas précisée. Les deux modèles empiriques utilisés découlent d'ouragans et d'inondations. Le deuxième modèle se base sur un plus large panel de cas historiques.

$$P = 0.304 E^{-5} h \quad \text{Ouragan Betsy}$$

$$P = \frac{0.34}{(1 + e^{(20.87 - 6.18 h)})} \quad \text{7 inondations dont ouragans Betsy et Camille}$$

La référence bibliographique [13] pourrait apporter des informations supplémentaires sur la conception du modèle statistique mais de la manière que pour la méthode présentée en 3.6, les différences entre les deux formules, qui pourtant comprennent un élément commun, l'ouragan Betsy, montrent que les limites d'utilisation d'un modèle statistique sont très restreintes.

### 3.8 ZHAI ET AL, 2006, JAPON (INONDATIONS)

Cette méthode, expliquée dans [8], permet l'estimation du **pourcentage de morts (P) ou de blessés (P<sub>b</sub>) au sein de la PAR** en fonction du nombre de bâtiments impactés et du nombre moyen de personnes par bâtiments. Les bâtiments sont qualifiés de résidentiels mais ne sont pas définis de manière précise. On peut supposer qu'il s'agit de maisons. Les auteurs ont tout d'abord déterminé une valeur seuil en dessous de laquelle le nombre de morts et de blessés peut être considéré comme nul et au dessus de laquelle ce nombre s'accroît rapidement.

Les valeurs seuils déterminées à partir d'une série de données historiques au Japon sont de :

- 1000 bâtiments impactés pour le nombre de morts ;
- 100 bâtiments impactés pour le nombre de blessés.

Au-delà de ces seuils, le pourcentage de morts ou de blessés (formule identique) est donné en fonction du nombre B de bâtiments et du nombre moyen de personnes par bâtiments n par l'équation suivante :

$$P = \frac{B^{a-1}}{n \times 10^b}$$

Les couples de coefficients a et b ont été obtenus par régression linéaire sur des données statistiques en considérant des périodes de temps, des saisons différentes, et le cas particulier des inondations rapides. Les tableaux de valeurs, tirée de [8] sont donnés en annexe E. Les coefficients de corrélation sont rarement supérieurs à 50%, ce qui fait dire aux auteurs que le modèle n'explique pas totalement le phénomène réel et que d'autres facteurs doivent être pris en compte, comme le temps d'alerte ou l'efficacité de l'évacuation. Les idées développées par les auteurs sont intéressantes et les paramètres d'entrée des modèles sont simples. La capacité de prévision de ces modèles est par contre assez faible.

### 3.9 MEEDDM (EX MEDAD), 2006, FRANCE (INONDATION)

Le MEEDDM a confié à l'IFEN la réalisation d'une méthode de détermination des enjeux en zone inondable. La méthode, exposée dans le document [5.2] donne une estimation **du nombre de personnes (PAR) présentes dans les zones à risque.**

Le principe de la méthode consiste à réaliser le croisement entre le zonage de l'aléa (zone inondable) avec trois autres bases de données. Deux de ces bases (Corine Land Cover 200 et BDCarto) contiennent des informations sur l'occupation du sol et permettent un découpage du territoire selon 3 catégories : les tissus urbains continus (tuc), les tissus urbains discontinus (tud) et le reste du territoire (autres). La troisième (Base BDCom) contient des informations sur la population basées sur le recensement de 1999 selon un découpage du territoire en îlots IRIS comportant à peu près 2000 personnes.

Pour chaque IRIS, une estimation de la densité d de chaque catégorie d'occupation des sols est estimée par régression linéaire en fonction du nombre réel N<sub>R</sub> de personnes comptabilisées dans l'IRIS et de la superficie de chaque zone selon un modèle linéaire sans constante. Un coefficient correctif C est défini pour que le nombre N<sub>E</sub> calculé à partir des densités estimées soit égal au nombre réel de personnes N<sub>R</sub>.

Pour chaque IRIS, la PAR est alors calculée en fonction de la densité d estimée, de la superficie S de chaque catégorie d'occupation des sols concernée par l'aléa et du coefficient correctif C, selon la formule :

$$PAR = C \times (S_{tuc} \times d_{tuc} + S_{tuc} \times d_{tuc} + S_{autres} \times d_{autres} )$$

Cette relation repose sur l'hypothèse que la population est répartie de manière de manière homogène au sein de chaque IRIS. La marge d'erreur de l'estimation sur des cas concrets est inférieure à 5% au niveau régional et à 10 % au niveau départemental. Les estimations à l'échelle communale ne sont par contre pas exploitables et il est nécessaire d'agréger plusieurs dizaines de communes pour obtenir des résultats satisfaisants.

### 3.10 MEEDDM (EX MEDAD), 2006, FRANCE (INSTALLATIONS CLASSEES AS)

La circulaire DPPR/SEI2/CB-06-0388 du 28/12/06 [5.1] introduit un guide d'élaboration et de lecture des études de danger pour les établissements soumis à autorisation avec servitude. Des indications sont données quant à la cotation en gravité des conséquences des effets thermiques, toxiques et de surpression associés aux accidents majeurs. Même si d'un point de vue technique les accidents redoutés sont tout à fait différents de ceux redoutés dans le cas d'un barrage, il est intéressant de la décrire car les barrages entrent dans un cadre réglementaire similaire.

Les résultats de la méthode sont les **estimations du nombre de personnes exposées** au phénomène dangereux pour chaque classe de dommages envisagée (effets létaux significatifs, effets létaux, effets irréversibles). Ces estimations sont assorties d'une probabilité et il est demandé de faire apparaître l'élément le plus pénalisant.

Le principe de la méthode est de déterminer les zones d'effets des phénomènes dangereux sur la base de valeurs seuils prédéfinies. Ensuite, il est nécessaire d'identifier les ensembles homogènes suivants et d'en déterminer la taille :

- les établissements recevant du public ;
- les zones d'activités ;
- les logements ;
- les voies de circulation (automobile, ferroviaire, navigable, piétonne) ;
- les terrains non bâtis ;
- les cas spéciaux relatifs à une occupation extrêmement temporaire (festivals, etc) ;
- les entreprises voisines de l'établissement considéré.

Des indications sont alors données pour procéder au comptage des personnes pour chacune de ces catégories. Ce comptage doit tenir compte « le cas échéant, des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et de la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'accident si la cinétique de l'accident le permet ». Il faut rappeler que l'évacuation n'est pas prise en compte dans cette méthode.

### 3.11 TSUCHIYA ET KAWATA, 1981, JAPON, (TYPHONS)

Les auteurs ont présenté dans le document [11] une discussion sur l'atteinte à la vie dans les cas de typhons. Aucune méthodologie n'a réellement été construite mais une idée assez originale a été développée et mérite d'être explicitée. Les auteurs ont en effet tenté de relier l'énergie du typhon et le nombre de morts. Des cas historiques ont été reportés sur la Figure 2, tirée de [11]. Il n'est pas envisageable d'appliquer aux barrages cette relation linéaire trouvée pour les typhons mais la même analyse statistique pourrait être conduite pour les barrages.

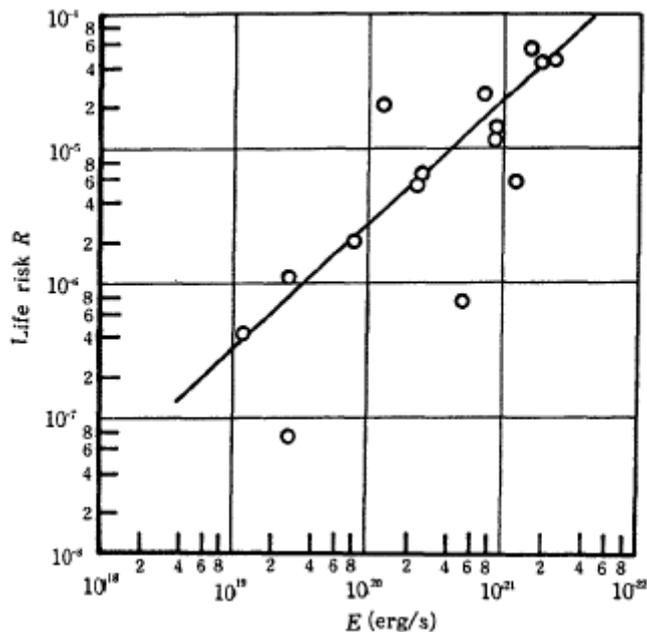


Figure 2 : Relation entre l'énergie du typhon et le risque d'atteinte à la vie (défini comme le nombre de morts sur la population totale du Japon)

### 3.12 TABLEAU SYNTHETIQUE DES METHODES NON SPECIFIQUES AUX BARRAGES

Le tableau reprend les 11 méthodes<sup>3</sup> décrites ci-dessous en précisant le domaine d'application et les paramètres utilisés dans la méthode.

Auteur	§	Domaine d'application	Résultat	Paramètres	
				h <sup>4</sup>	Autres
Friedman	3.1	catastrophes naturelles	Nombre de morts	-	Nombre de bâtiments impactés Cinétique de montée des eaux Nombre moyen de personnes par bâtiment
Petak and Atkisson,	3.2	catastrophes naturelles	Nombre de morts	-	Coût des dégâts matériels
Waarts	3.3	inondations côtières et fluviales	% de morts dans la PAR	Oui	
Vrouwenvelder and Steenhuis	3.4	inondations côtières et fluviales	% de morts dans la PAR	Oui	Cinétique de montée des eaux
CMDC	3.5	tsunamis	% de morts dans la PAR	Oui	
Mizutani	3.6	typhons	% de morts dans la PAR	Oui	
Boyd / Boyd et al	3.7	ouragans, inondations	% de morts dans la PAR	Oui	
Zhai et Al	3.8	inondations	% de morts dans la PAR % de blessés dans la PAR	-	Nombre de bâtiments impactés Nombre moyen de personnes par bâtiment
MEEDDM	3.9	inondations	PAR	-	Données de recensement Contour géographique de l'aléa
MEEDDM	3.10	Accident majeur pour les Installations Classées AS	PAR	-	Types de bâtiments – Type d'occupation du territoire Contour géographique de l'aléa
Tsuchiya et Kawata	3.11	typhons	Nombre de morts	-	Energie du typhon

*Tableau 1 : Tableau synthétique des méthodes non spécifiques aux barrages*

<sup>3</sup> D'autres méthodes ont également été mentionnées dans les ouvrages de référence, mais n'étaient pas assez détaillées pour être exposées dans ce chapitre au même niveau que les autres.:

- Sugimoto et al, 2003, Japon, (Tsunamis) [19]
- Vrouwenvelder and Steenhuis, 1997, Pays-Bas (inondations côtières et fluviales [4.3]
- Duiser, 1989, Pays-Bas (inondations côtières et fluviales) [4.1]
- Jonkman, 2001, Pays-Bas (inondations côtières et fluviales) [4.4]

<sup>4</sup> h : hauteur d'eau

## 4. METHODES SPECIFIQUES AUX BARRAGES S'ARRETANT A LA DETERMINATION DE LA POPULATION POTENTIELLEMENT IMPACTEE

Deux méthodes australiennes, spécifiques aux barrages et s'arrêtant à la détermination de la PAR sont décrites ci-dessous.

### 4.1 ANCOLD<sup>5</sup>, 2000, AUSTRALIE

L'ANCOLD suggère de s'arrêter à la détermination de la PAR car cet indicateur peut être estimé de manière bien plus précise que le nombre de morts au sein de la PAR. De manière qualitative, la détermination de la PAR devrait idéalement tenir compte des taux d'occupation des bâtiments, (habitations, bureaux, écoles, campings, etc), des itinérants (pêcheurs, randonneurs, etc) et des différentes périodes du jour et de l'année. Le critère proposé pour définir la zone au sein de laquelle le comptage doit être fait est la hauteur d'eau. Le comptage est ainsi limité à la zone d'inondation où la hauteur d'eau est supérieure à 30 cm.

D'autre part, la méthode propose de considérer conjointement la PAR et les dommages économiques et environnementaux<sup>6</sup>, ainsi que l'impact social pour définir une gravité globale des conséquences de la rupture (matrice présentée en Figure 3).

Population potentiellement impactée PAR	Intensité des dommages économiques, sociaux et environnementaux			
	Négligeable	Mineure	Moyenne	Majeure
0	Très faible	Très faible	Faible	Significatif
1 à 10	Faible Notes 1 et 4	Faible Notes 4 et 5	Significatif note 5	Elevé C note 6
11 à 100	Note 1	Significatif Notes 2 et 5	Elevé C note 6	Elevé B note 6
101 à 1000		Note 2	Elevé A note 6	Elevé A note 6
> 1000			Note 3	Extrême Note 6

- note 1 avec une PAR de 5 ou plus, il est peu probable que l'intensité des dommages économiques, sociaux et environnementaux soit *négligeable*
- note 2 avec une PAR de 10 ou plus, il est peu probable que l'intensité des dommages économiques, sociaux et environnementaux soit *mineure*
- note 3 avec une PAR de 1000 ou plus, il est peu probable que l'intensité des dommages économiques, sociaux et environnementaux soit *moyenne*
- note 4 devient *significatif* quand la possibilité qu'il y ait un mort est reconnue
- note 5 devient *élevée* quand la possibilité qu'il y ait un mort est reconnue
- note 6 D'autres facteurs peuvent être pris en compte pour juger d'un potentiel de danger élevée. Des indications d'ordre général sont fournies dans le texte original.

Figure 3 : Matrice de détermination de la catégorie de danger (d'après [7])

<sup>5</sup> Australian National Committee on Large Dams

<sup>6</sup> Des indications sont données dans le guide [7] pour estimer l'intensité des dommages économiques, sociaux et environnementaux à partir de plusieurs critères. La grille de critères ainsi que les indications pour l'estimation sont données en anglais en Annexe 3.

## **4.2 QUEENSLAND GOVERNMENT, 2002, AUSTRALIE**

Le guide produit par l'Etat du Queensland définit la PAR pour un événement donné (rupture du barrage sans crue, rupture du barrage lors d'une crue, etc.) comme le nombre de personnes à risque résultant de la rupture du barrage auquel est soustrait le nombre de personnes à risque propre à l'évènement.

Le guide propose de déterminer la PAR en trois étapes :

- Déterminer pour un évènement donné, la zone d'impact de la rupture du barrage, c'est-à-dire la zone où le niveau d'eau se trouve à une cote supérieure à 300 mm à la cote de l'évènement envisagé ;
- Déterminer à l'intérieur de cette première enveloppe, les zones où la hauteur d'eau est supérieure à 300 mm ;
- Recenser les différents bâtiments et utiliser une table donnant le nombre moyen de personnes dans chaque type de bâtiment (donnée en annexe F) pour calculer la PAR.

## **5. METHODES SPECIFIQUES AUX BARRAGES BASEES SUR UN MODELE EMPIRIQUE**

Dans ce chapitre sont listées les méthodes d'estimation spécifiques aux barrages et basées sur un modèle empirique. La méthode la plus connue et la plus aboutie, appelée méthode de Graham 1999, est développée en 5.4. Elle est associée aux travaux de plusieurs autres auteurs qui ont participé à construire ou améliorer cette méthode centrale.

### **5.1 AYYASWAMY ET AL, 1974, USA**

La méthode développée par ce groupe de travail permet d'estimer le nombre de morts suite à une rupture de barrage provoquée par un tremblement de terre d'intensité IX et X sur l'échelle de Mercalli modifiée. La méthode a été appliquée sur 11 barrages californiens et a donné des résultats très pessimistes (entre 11000 à 260000 morts), très au-dessus de ce qui a été observé lors de ruptures réelles de barrages.

La méthode comprend différentes étapes dont :

- Une simulation permettant d'estimer la probabilité du séisme ;
- Une simulation permettant de définir l'onde de submersion ;
- Une définition de la PAR à partir du recensement américain de 1970 en différenciant jour et nuit. Il s'agit en réalité des personnes susceptibles de se trouver sous 3 m d'eau avant évacuation ;
- Une fonction d'évacuation qui est définie en fonction du temps disponible entre la rupture du barrage et l'arrivée de l'onde. Il est considéré que 50% de la PAR évacue dans la première heure, 75 % dans la deuxième et que l'évacuation complète dure plus de 10 heures ;
- Le nombre est alors estimé comme la PAR n'ayant pas pu évacuer.

### **5.2 MCCANN ET AL, 1985-1986 : STANFORD/FEMA MODEL, USA**

Cette méthode s'applique aux ruptures de barrage. La première étape consiste à segmenter la carte d'inondation (donnée par un simulateur externe) en plusieurs zones en fonction de la distance au barrage et de la hauteur d'eau. Dans la version révisée de la méthode, le critère de distance est remplacé par le critère de temps d'alerte.

Le nombre de morts  $N$  est alors calculé à partir de la formule suivante utilisée pour chaque zone :

$$N_{\text{zone}} = m(h) \times p_1 \times p_2 \times \text{Par}_{\text{zone}}$$

*$m(h)$  : fonction de mortalité en fonction de la hauteur d'eau*

*$p_1$  : pourcentage de PAR présent lorsque la vague arrive*

*$p_2$  : pourcentage de temps pendant lequel la zone est occupée*

La fonction  $m(h)$  est définie dans le tableau de la Figure 4.

Hauteur d'eau	Mortalité
0.6	0%
1.2	5%
1.8	20%
2.4	40%
3	60%
3.6	80%
>3.6	85%

Figure 4 : Mortalité en fonction de la hauteur d'eau (d'après McCann et al, 1985 citée dans [2. 1])

Les différents paramètres ont été établis de manière subjective et n'ont pas été calibrés par des données historiques. En pratique, les personnes utilisant la méthode ne vont jamais jusqu'à estimer le nombre de morts mais s'arrêtent à l'estimation du nombre de personnes potentiellement impactées.

### 5.3 PATE-CORNELL AND TAGARAS, 1986, USA

Cette méthode, développée dans le cadre d'analyses coût-bénéfice de construction ou de rénovation de barrages, permet d'estimer le pourcentage de morts au sein de la PAR. Deux zones différentes sont distinguées par les auteurs, il s'agit du « chemin de vague » (zone 1) et de l' « aire d'inondation » (zone 2). Les deux termes ne sont pas définis précisément. Sur la base de la catastrophe de Malpasset, le taux de mortalité est estimé à 50 % dans la zone 1 et à 0 % dans la zone 2. Les auteurs indiquent que ce taux peut être réduit en fonction de la qualité de l'alerte mais ne donnent pas de recommandations.

### 5.4 METHODE DE GRAHAM 1999 (+ MODELES DERIVES), USA

La méthode développée par Graham en 1999 est la plus connue des méthodes se basant sur un modèle empirique. Elle est l'aboutissement des travaux de plusieurs auteurs et a également été complétée, utilisée voire simplifiée par la suite (Figure 5).

La méthode est expliquée dans le document suivant :

- Graham, W. J. 1999. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. U.S. Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, Report no. DSO-99-06. 44 p.[1.4]

La méthode se décompose en plusieurs étapes comme illustrée à la Figure 6. Les différentes étapes sont reprises ci-dessous.

### 5.4.1 ETAPE 1 : DETERMINER LES SCENARIOS DE RUPTURE DU BARRAGE A EVALUER

Plusieurs scénarios de rupture doivent être envisagés, par exemple en admettant la rupture lorsque le réservoir est rempli normalement ou lorsque la rupture intervient lors d'une crue.

### 5.4.2 ETAPE 2 : DETERMINER LES DIFFERENTES PERIODES DE TEMPS A PRENDRE EN COMPTE (ETE/HIVER ; JOUR/NUIT)

La PAR peut varier temporellement, selon la saison, les jours de la semaine et également aux différents moments de la journée. Il est par exemple important de considérer un scénario de jour et un de nuit.

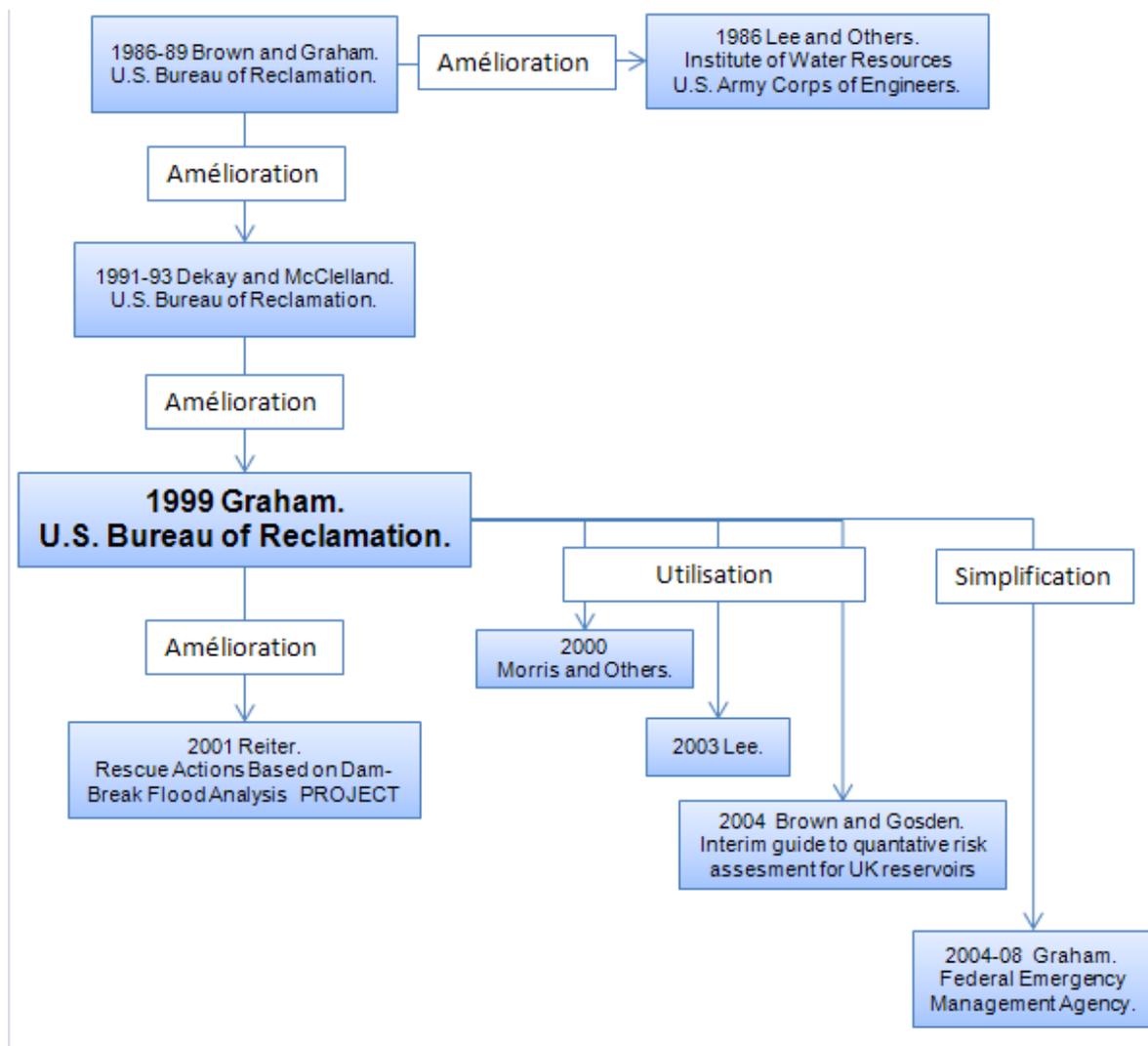


Figure 5 : Schéma présentant les différents travaux gravitant autour de la méthode de GRAHAM

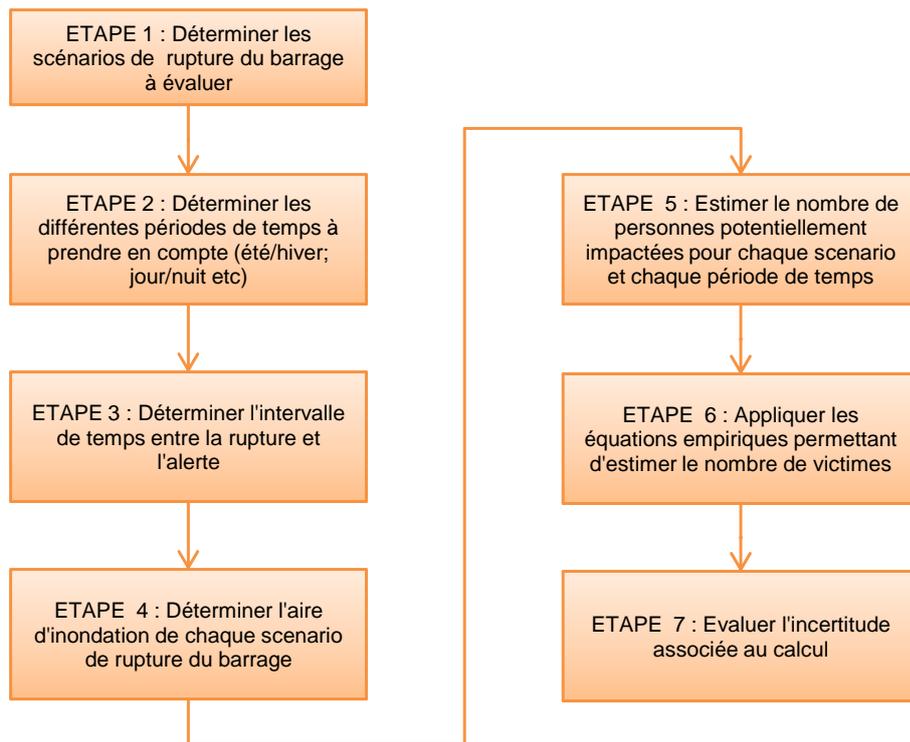


Figure 6 : Structure de la méthode de Graham 1999

### 5.4.3 ETAPE 3 : DETERMINER L'INTERVALLE DE TEMPS ENTRE LA RUPTURE ET L'ALERTE

Cette étape est très importante, étant donné que ce paramètre sera prépondérant dans le modèle empirique d'estimation de la mortalité. De manière générale, la cinétique est plus rapide pour les barrages en béton que pour les barrages en terre. Pour ces derniers, l'intervalle de temps peut être estimé à partir du tableau de la Figure 7. Ce tableau a été construit sur la base de données historiques. D'autres facteurs comme, la tenue d'un plan d'intervention d'urgence, l'instrumentation du site et du barrage peuvent bien entendu influencer l'estimation.

Cause de la rupture	Considérations spéciales	Jour/Nuit	Intervalle de temps entre la rupture et l'alerte	
			Présence de plusieurs observateurs sur site <sup>1</sup>	Pas d'observateurs sur site <sup>2</sup>
rupture par déversement	bassin versant du barrage de moins de 260 km <sup>2</sup>	Jour	1 quart d'heure avant la rupture	1 quart d'heure après l'arrivée de l'eau dans des secteurs peuplés
		Nuit	1 quart d'heure après la rupture	1 heure après l'arrivée de l'eau dans des secteurs peuplés
	bassin versant du barrage de plus de 260 km <sup>2</sup>	Jour	2 heures avant la rupture	1 heure avant la rupture du barrage
		Nuit	1 à 2 heures avant la rupture	0 à 1 heure avant la rupture du barrage
rupture par érosion interne (réservoir plein, conditions climatiques nomales)		Jour	1 heure avant la rupture	1 quart d'heure après l'arrivée de l'eau dans des secteurs peuplés
		Nuit	1 demi-heure après la rupture	1 heure après l'arrivée de l'eau dans des secteurs peuplés
séisme	rupture instantanée	Jour	1 quart d'heure après la rupture	1 quart d'heure après l'arrivée de l'eau dans des secteurs peuplés
		Nuit	1 demi-heure après la rupture	1 heure après l'arrivée de l'eau dans des secteurs peuplés
	rupture différée	Jour	2 heures avant la rupture	1 demi-heure avant l'arrivée de l'eau dans des secteurs peuplés
		Nuit	2 heures avant la rupture	1 demi-heure avant l'arrivée de l'eau dans des secteurs peuplés

<sup>1</sup>le barrage est surveillé par un gardien ou le barrage est visible depuis de nombreuses habitations ou la crête du barrage est une route très fréquentée. Ces barrages sont typiques des zones urbaines.

<sup>2</sup>le barrage n'est pas surveillé par un gardien, il n'y a aucune habitation au voisinage du barrage et la crête du barrage n'est pas utilisée comme une route. Ces barrages sont le plus souvent dans les endroits reculés.

*Figure 7 : Tableau d'aide à l'estimation de l'intervalle de temps entre la rupture d'un barrage en terre et l'alerte, tiré de [1.4]*

#### **5.4.4 ETAPE 4 : DETERMINER L'AIRES D'INONDATION DE CHAQUE SCENARIO DE RUPTURE DE BARRAGE**

L'onde de submersion doit être déterminée de manière assez précise car les incertitudes liées à la détermination de l'onde de submersion impactent l'estimation des paramètres essentiels que sont la PAR, le délai d'alerte et l'intensité de l'inondation.

### 5.4.5 ETAPE 5 : ESTIMATION DE LA PAR POUR CHAQUE SCENARIO ET CHAQUE PERIODE DE TEMPS

Pour chaque scénario de rupture et chaque période de référence (jour, nuit etc) le nombre de personnes potentiellement impactées (PAR) est déterminé. La PAR est définie comme le nombre de personnes occupant la zone d'inondation avant l'alerte. Il peut être utile d'utiliser les données de recensement, des photos aériennes, des cartes topographiques et de réaliser des enquêtes téléphoniques et sur site. L'auteur préconise de réaliser l'étude jusqu'à 50 km en aval du barrage pour les ouvrages normaux et jusqu'à environ 160 km pour les ouvrages de taille importante.

### 5.4.6 ETAPE 6 : APPLIQUER UN MODELE EMPIRIQUE PERMETTANT D'ESTIMER LE NOMBRE DE VICTIMES

L'estimation du nombre de morts ou de la mortalité peut être réalisée avec différents modèles empiriques. Les deux modèles empiriques de Brown and Graham et de Dekay et McClelland sont présentés rapidement avant de développer le modèle empirique recommandé par Graham en 1999.

#### 5.4.6.1 MODELE EMPIRIQUE DE BROWN AND GRAHAM 1986-1989

Ce modèle basé sur une liste de 24 cas réels donne une estimation du nombre de morts  $N$  en fonction de la PAR et du temps d'alerte, défini dans ce cas comme l'intervalle de temps entre l'alerte et l'arrivée de l'eau.

$$N = 0.5 \times PAR \quad \text{si le temps d'alerte est inférieur à 15 minutes}$$

$$N = PAR^{0.6} \quad \text{si le temps d'alerte est compris entre 15 et 90 minutes}$$

$$N = 0.0002 \times PAR \quad \text{si le temps d'alerte est supérieur à 90 minutes}$$

#### 5.4.6.2 MODELE EMPIRIQUE DE DEKAY ET MCCLELLAND 1991-1993

Ce modèle est une extension du modèle précédent. Il donne une estimation du nombre de morts  $N$  en fonction de la PAR, du temps d'alerte  $T_a$ , défini dans ce cas comme l'intervalle de temps entre l'alerte et l'arrivée de l'eau et de la dangerosité de l'inondation. L'inondation est considérée comme dangereuse si plus de 20% des bâtiments inondés sont détruits ou très endommagés et peu dangereuse dans le cas contraire.

$$N = \frac{PAR}{1 + 13.277 (PAR^{0.44}) e^{[2.982(T_a) - 3.790]}} \quad \text{si l'inondation est dangereuse}$$

$$N = \frac{PAR}{1 + 13.277 (PAR^{0.44}) e^{[0.759(T_a)]}} \quad \text{si l'inondation est peu dangereuse}$$

#### 5.4.6.3 MODELE EMPIRIQUE DE GRAHAM 1989

Ce modèle se base sur une série de 40 inondations rapides dont la plupart sont consécutives à une rupture de barrage qui comprend les données utilisées par Brown and Graham et Dekay et McClelland. Contrairement aux précédents, le modèle de GRAHAM 1999 ne cherche pas à lier les différents paramètres par une formule mathématique. La mortalité au sein de la PAR est reliée à trois paramètres d'entrée décrits ci-après.

##### ▪ Temps d'alerte

Le temps d'alerte, défini comme l'intervalle de temps entre la rupture et l'alerte, est pris en compte selon trois niveaux.

- 1) Pas d'alerte par des officiels ou des médias avant l'arrivée de l'eau, seuls le bruit ou la vue de l'eau servent d'alerte ;
- 2) L'alerte est donnée par les médias et les autorités dans la zone concernée 15 à 60 minutes avant l'arrivée de l'eau. Certaines personnes sont informées par leurs amis, les voisins ou des parents ;
- 3) L'alerte est correctement donnée par les autorités ou les médias plus d'une heure avant l'arrivée de l'eau. Certaines personnes sont informées par leurs amis, les voisins ou des parents.

##### ▪ Dangersité de l'inondation

La dangersité de l'inondation est qualifiée selon trois niveaux :

- 1) faible intensité : aucun bâtiment n'est arraché de ces fondations ;
- 2) intensité moyenne : les bâtiments sont détruits mais il reste des arbres ou des vestiges pouvant servir de refuge ;
- 3) intensité élevée : l'onde de submersion rase tout sur son passage et il ne reste rien. Cette classe ne doit être utilisée que pour les ruptures instantanées de barrages (liquéfaction de barrage en remblais ou effacement soudain de barrage en béton). La montée des eaux jusqu' à son maximum prends quelques minutes. L'intensité devient moyenne puis faible au fur et à mesure que l'on descend dans la vallée.

Des critères supplémentaires peuvent être utilisés pour choisir entre intensité faible et intensité moyenne.

Si la majorité des bâtiments est exposée à des hauteurs d'eau inférieures à 3m, il faut qualifier l'intensité de faible et de moyenne dans le cas contraire.

On peut également utiliser un paramètre PV homogène à une hauteur d'eau multipliée par une vitesse et censé donner une bonne indication de la dangerosité de l'onde de submersion en un site donné. Le paramètre PV est défini en fonction du débit de l'onde de submersion (Qos), du débit annuel moyen sur le site (Qm) et de la largeur maximale de l'onde de submersion (Los) par la relation suivante :

$$PV = \frac{Q_{os} - Q_m}{L_{os}}$$

L'intensité peut être considérée comme faible lorsque PV est inférieur à 4.6 m<sup>2</sup>/s et moyenne au-dessus de cette valeur.

#### ▪ Conscience de l'intensité de l'inondation

La conscience de la population de la dangerosité de l'inondation est qualifiée selon deux niveaux :

- 1) Conscience vague du danger par manque d'expérience ou de sensibilisation ;
- 2) Conscience aigüe du danger suite à une expérience personnelle ou à des campagnes de sensibilisation.

Les 40 accidents répertoriés (rupture ou inondations rapides) ont permis de définir 50 cas de figure qui ont ensuite été classés dans le tableau de la Figure 8. Pour chaque combinaison des trois paramètres retenus, la moyenne et les extrema du taux de mortalité ont été renseignés. Des ajustements ont ensuite été réalisés par les auteurs pour créer un nouveau tableau de valeurs à utiliser pour l'estimation. Les ajustements ne sont pas basés sur un raisonnement statistique mais sur le jugement des auteurs.

Intensité de l'inondation	Intervalle de temps entre l'alerte et l'arrivée des eaux	Conscience du danger encouru	Nombre de cas	Taux de mortalité	
				Moyenne	Extrema
élevée	pas d'alerte	pas pertinent	8	0.76	[0.3;1]
		vague	0	-	-
	de 15 à 60 minutes	aigüe	0	-	-
		vague	0	-	-
moyenne	pas d'alerte	pas pertinent	13	0.14	[0.02;0.43]
		vague	1	0.014	-
	de 15 à 60 minutes	aigüe	1	0.01	-
		vague	1	0.05	-
faible	pas d'alerte	pas pertinent	5	0.007	[0 ;0.025]
		vague	4	0.0095	[0.007;0.012]
	de 15 à 60 minutes	aigüe	1	0	-
		vague	0	-	-
plus d'une heure	aigüe	12	0.0003	[0;0.002]	
	vague	0	-	-	

Figure 8 : Tableau de répartition des 50 cas de figures historiques selon les trois paramètres (d'après [1.4])

Intensité de l'inondation	Intervalle de temps entre l'alerte et	Conscience du danger encouru	Taux de mortalité suggéré	
			Moyenne	Extrema
élevée	pas d'alerte	pas pertinent	0.75	[0.3;1]
	de 15 à 60 minutes	vague	Utiliser les valeurs ci-dessus et appliquer au nombre de personnes restées dans la zone d'inondation après l'alarme	
		aigüe		
	plus d'une heure	vague		
aigüe				
moyenne	pas d'alerte	pas pertinent	0.15	[0.03;0.35]
	de 15 à 60 minutes	vague	0.04	[0.01;0.08]
		aigüe	0.02	[0.005;0.04]
	plus d'une heure	vague	0.03	[0.005;0.06]
aigüe		0.01	[0.002;0.02]	
faible	pas d'alerte	pas pertinent	0.01	[0;0.02]
	de 15 à 60 minutes	vague	0.007	[0;0.015]
		aigüe	0.002	[0;0.004]
	plus d'une heure	vague	0.0003	[0;0.0006]
aigüe		0.0002	[0;0.0004]	

Figure 9 : Recommandations pour l'estimation du taux de mortalité (d'après [1.4])

#### 5.4.7 ETAPE 7 : EVALUER L'INCERTITUDE ASSOCIEE AU CALCUL

L'auteur de la méthode estime que l'estimation du nombre de morts en cas de rupture de barrage n'est pas à proprement parler une science mais plutôt un art. Il y a en effet de très nombreuses sources d'incertitudes qui sont difficiles à capter. L'établissement de différents scénarios de rupture et la prise en compte de différentes périodes de temps sont donc indispensables à une bonne estimation.

### 5.5 RAMSBOTTOM ET AL, 2003, 2004, DEFRA, ROYAUME UNI [26]

Ramsbottom et al ont principalement travaillé sur le risque d'atteinte à la vie dans le cadre des inondations. Dans ce cadre, ils ont rédigé une fiche spécifique aux inondations causées par des déversements ou des ruptures de barrages. La méthodologie se déroule en trois points présentés ci-dessous et donne finalement une estimation du nombre de blessés et du nombre de morts. La méthode a été initialement conçue pour les inondations et il n'est pas indiqué clairement sur quelle assise statistique ont été calibrées les différentes équations. Les auteurs ont appliqués la méthode sur trois cas d'inondations avec de bons résultats.

#### 5.5.1 ESTIMATION DU NIVEAU DE DANGER RELATIF A L'INONDATION

Un indice de danger D est calculé de cette façon :

$$D = h * (v + 0.5) + d$$

Avec h la hauteur d'eau en m, v la vitesse de l'eau en m/s et d un facteur relatif aux débris déterminé grâce au Tableau 2.

Cet indice a priori tiré de tests de stabilité. L'échelle de D est donnée au Tableau 3. La cartographie de cet indice permet de définir différentes zones de danger.

Hauteur d'eau	Zone agricole	Zone boisée	Zone urbaine
0 à 0.25 m	0	0	0
0.25 à 0.75 m	0	0.5	1
> 0.75 m et/ou vitesse supérieure à 2 m/s	0.5	1	1

Tableau 2 : Coefficient d en fonction du type d'occupation des sols, de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'eau

D	Niveau de danger d'inondation	Description
< 0.75	Faible	Mise en garde
0.75 - 1.25	Modérée	Danger pour certains (i.e. enfants)
1.25 - 2.5	Significatif	Danger pour la plupart des gens
> 2.5	Extrême	Danger pour tous

Tableau 3 : Echelle de l'indice de danger, adaptée de [26]

### 5.5.2 ESTIMATION DE LA VULNERABILITE DE LA ZONE

La vulnérabilité de la zone V est estimée en sommant les scores des trois paramètres (valeurs entre crochets) présentés au Tableau 4. Le paramètre alerte est normalement fixé à 3 dans le cas des barrages. Il peut être réduit si la rupture est lente et si une alerte est donnée.

Paramètre	zone à faible risque	zone à risque moyen	zone à haut risque
Rapidité de l'inondation	plusieurs heures [1]	environ une heure [2]	rapide [3]
Type de zone	immeubles de plusieurs étages [1]	zones pavillonnaires, zones commerciales et industrielles [2]	bungalows, mobile homes, routes embouteillées, parcs, école en rez-de-chaussée, campings, etc [3]
Alerte	[ 3 - (P1* (P2+P3)) ] P1 = % effectif de couverture de l'alerte P2 = % de temps disponible P3 = % d'efficacité réelle de l'alerte		

Tableau 4 : Valeur des différents paramètres pour le calcul de la vulnérabilité de la zone

### 5.5.3 ESTIMATION DU RISQUE SUR LES PERSONNES

Les nombres de blessés  $N_b$  et de morts  $N_m$  sont calculés selon les équations suivantes :

$$N_b = N * X * 2 * Y \text{ et } N_m = N_b * 2 * D \text{ où}$$

- N est la population dans la plaine d'inondation ;
- X est la proportion de la population exposée au risque déterminée par le produit de la vulnérabilité V de la zone et de l'indice de danger D ( $X = D * V^7$ ) ;
- Y est la proportion des personnes exposées qui vont effectivement mourir ou être blessées déterminée par la somme de la proportion de personnes âgées de plus de 75 ans et la proportion de personnes handicapées ou infirmes.

<sup>7</sup> Si le produit de V par D est supérieur à 100, X est fixé à 100

## 6. METHODES BASEES SUR UN MODELE CONCEPTUEL SPECIFIQUE AUX BARRAGES

Deux méthodes basées sur un modèle conceptuel ont été trouvées dans la littérature. Le terme simulateur sera utilisé dans la suite du texte.

### 6.1 LIFE SAFETY MODEL

L'élaboration de ce simulateur (LSM ou BCHLSM) a été subventionnée par British Columbia Hydro, producteur et distributeur d'électricité hydraulique au Canada. De nombreux chercheurs ont contribué à ce travail dont Assaf et Hartford.

L'environnement du barrage est modélisé par un noyau fixe<sup>8</sup> décrit par les paramètres statiques et des scénarios<sup>9</sup> permettant d'intégrer les variations des paramètres dynamiques. La méthode se base largement sur les Systèmes d'Information Géographiques disponibles et sur les données de recensement pour construire des représentations spatio-temporelles de la PAR. Le tableau de la Figure 10 présente un exemple de la variation temporelle de la PAR : dans ce cas, les variations spatiales découlent du niveau d'eau dans le réservoir et influent également sur l'estimation de la PAR.

Période de l'année	Niveau d'eau dans le réservoir	Jours de la semaine	Heures du jour	PAR
Janvier-Mars	40 m	lundi-vendredi	8h - 17h	2
			17h - 22h	2
			22h - 8h	21
		samedi-dimanche	22h - 8h	6
			8h - 22h	6
Avril-Juin	60 m	lundi-vendredi	8h - 17h	19
			17h - 22h	29
			22h - 8h	35
		samedi-dimanche	22h - 8h	25
			8h - 22h	35
Juillet-Septembre	80 m	lundi-vendredi	8h - 17h	4556
			17h - 22h	4675
			22h - 8h	4209
		samedi-dimanche	22h - 8h	3925
			8h - 22h	3876
Octobre-Décembre	75 m	lundi-vendredi	8h - 17h	2564
			17h - 22h	2997
			22h - 8h	2848
		samedi-dimanche	22h - 8h	2672
			8h - 22h	2789

Figure 10 : Exemple de variation de la PAR (d'après ASSAF et al, 1997, cité dans [Risk and Uncertainty in Dam Safety])

<sup>8</sup>People's World Model (PWM)

<sup>9</sup>Scénario Generator

La simulation de l'onde de submersion n'est pas intégrée dans l'outil mais rapatriée d'un simulateur externe. Un module interne<sup>10</sup> est ensuite utilisé pour simuler le comportement des personnes dont le schéma conceptuel est présenté en Figure 11). Le modèle de comportement s'applique à l'échelle de l'individu et nécessite que chaque individu soit mis dans une classe (adulte, enfant, sénior, etc) dont les caractéristiques sont définies au préalable. Des groupes de personnes peuvent être créés pour symboliser un lien social ou familial, ou des mouvements de foule. Sur la Figure 11, chaque nœud test met en relief un critère qu'il faut calibrer. Par exemple, un des critères important que l'on retrouve est la stabilité d'une personne dans un courant en fonction de la vitesse et de la hauteur d'eau. D'autres modules complémentaires sont également utilisés pour simuler la propagation de l'alerte, le trafic et l'endommagement des bâtiments et des réseaux.

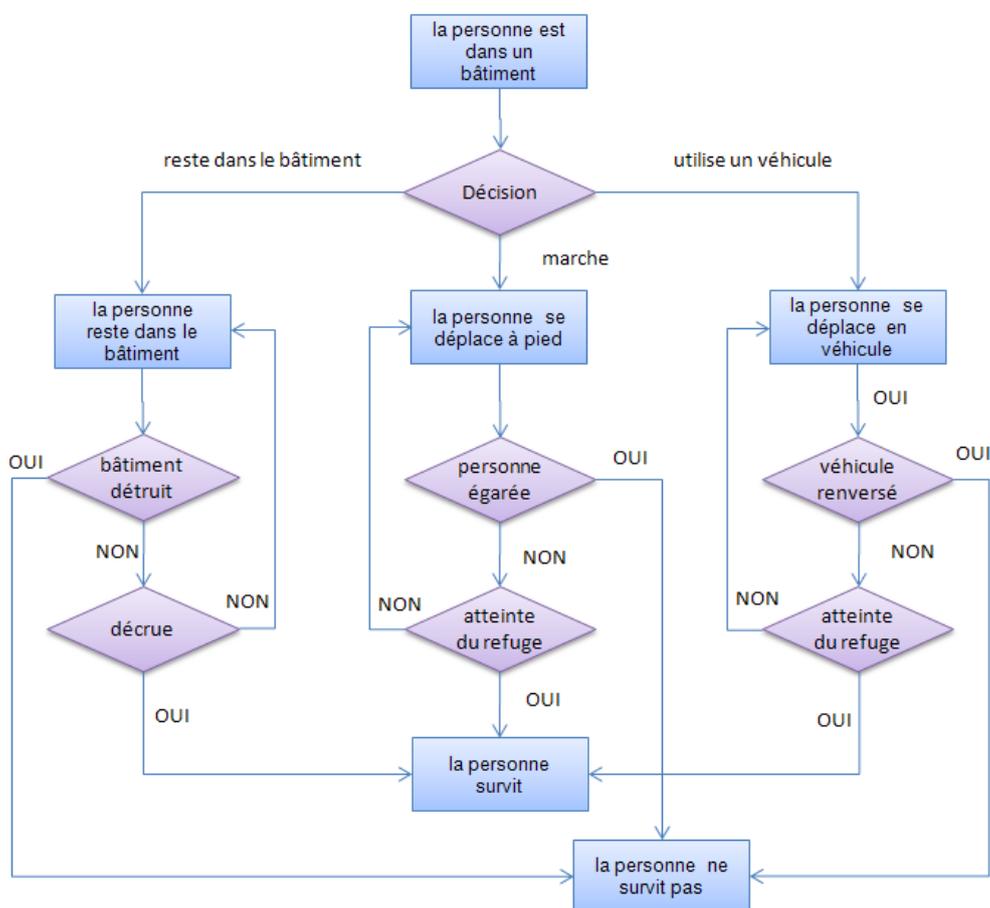


Figure 11 : Modèle conceptuel du comportement d'une personne dans le simulateur LSS (d'après [3.1])

<sup>10</sup> Life Safety Simulator (LSS)

## 6.2 LIFE SIM

Ce simulateur a été développé pour l'Institute for Water Resources, Us Army Corps of Engineers et pour l'Australian National Committee on Large Dams. Les deux rapports suivants sont disponibles sur ce simulateur :

- McClelland, D.M., D.S. Bowles. 2002. Estimating life loss for dam safety risk assessment – a review and new approach, IWR report 02-R-3. 420 p. [2.1] ;
- Aboelata, M., D.S. Bowles, D. M. McClelland. 2003. LifeSim : A model for estimating dam failure life loss. Draft report prepared for IWR and ANCOLD. 274 p.[2.2].

Le premier rapport, qui fait l'état de l'art des modèles existants, montre l'insuffisance des modèles empiriques et établit la liste des paramètres du problème de l'estimation de la mortalité en cas de rupture de barrage. Les différents paramètres du problème, dont le nombre dépasse 90, sont décrits sur 85 pages. Les auteurs ont dressé une annexe « tools for researchers » qui référence l'ensemble des variables. De nombreux cas réels ont été étudiés afin de choisir les paramètres les plus pertinents pour chaque phase. Le deuxième rapport disponible est une présentation approfondie de LifeSim. Le premier paragraphe présente la structure générale du simulateur et les paragraphes suivants donnent une description rapide des modules les plus intéressants.

### 6.2.1 STRUCTURE DU SIMULATEUR

Le simulateur LifeSim a une structure modulaire présentée en Figure 12. Les trois modules qui constituent réellement le modèle sont les suivants :

- Module « Perte de protection » ;
- Module « Alerte et Evacuation » ;
- Module « Atteinte à la vie ».

Les autres modules permettent de préparer les données et de visualiser les résultats. Ils permettent notamment de rapatrier des données depuis des bases de données externes mais également depuis des logiciels de simulation de l'onde de submersion (DAMBRK et HEC-RAS). Enfin, un module permettant une approche probabiliste est également intégré et permet de réaliser une analyse probabiliste sur un des trois modules principaux au choix.

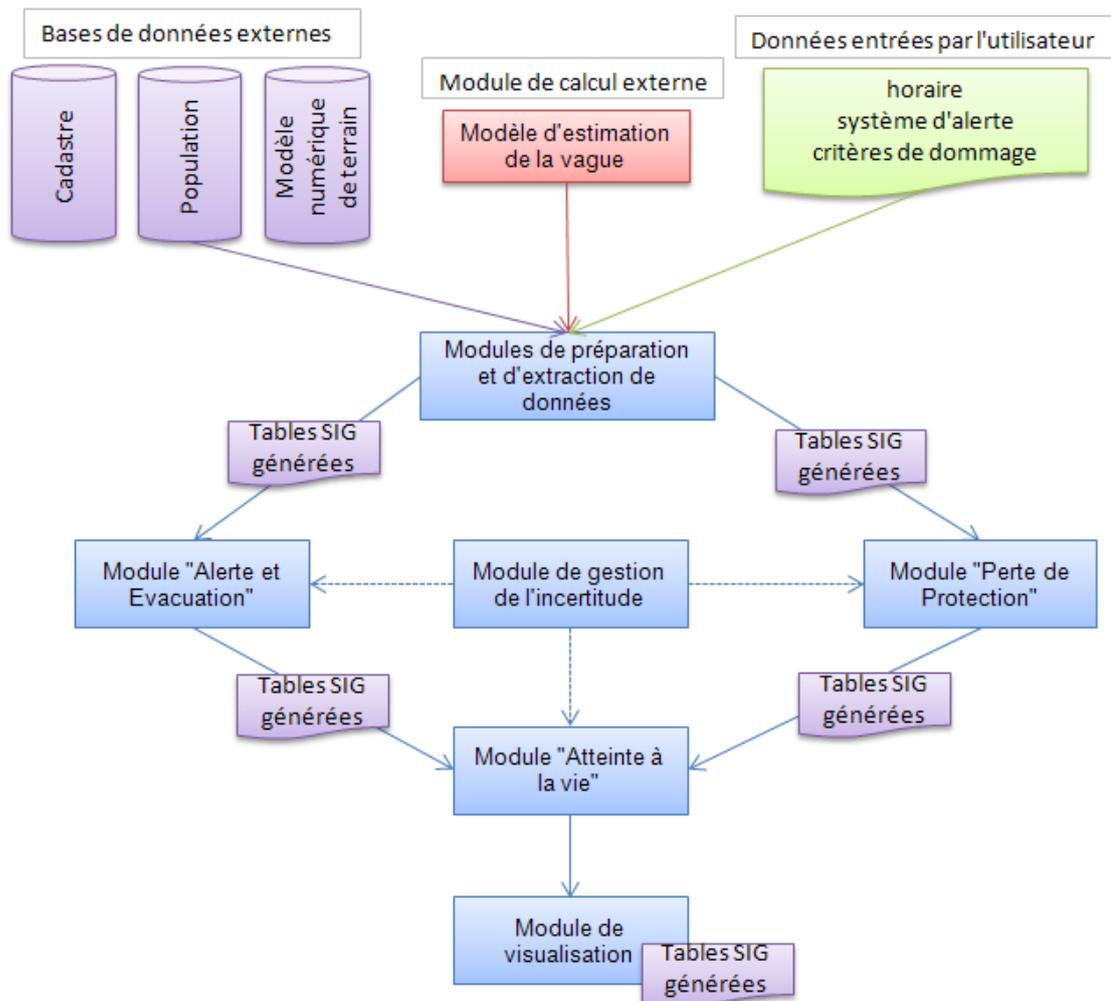


Figure 12 : Représentation schématique du simulateur LifeSim (d'après [2.2])

## 6.2.2 PREPARATION DES DONNEES

LifeSim a été construit pour être appliqué sur une série de scénarios qui inclut différents types de ruptures ou de déversements. Le temps est également pris en compte et LifeSim permet de considérer 12 moments différents de la journée pour lesquels la population potentiellement impactée, ses activités, l'efficacité de l'alerte et de la mobilisation varient. L'utilisateur peut également spécifier des différences liées par exemple au jour de la semaine.

La représentation de l'inondation est réalisée selon un maillage plus ou moins serré dans l'espace et dans le temps et découle d'un simulateur externe. Les paramètres pris en compte sont la hauteur d'eau et la vitesse de l'onde. Il est possible de choisir le pas de temps du modèle d'alerte et d'évacuation (par exemple la minute pour une rupture soudaine, 5 à 10 minutes pour des ruptures plus lente).

L'utilisateur définit des abris où les populations pourront se réfugier que ce soit à l'extérieur de la plaine d'inondation ou à l'intérieur (par exemple immeuble haut et résistant). Ces refuges sont utilisés comme des points de destination et il n'est pas considéré une capacité maximum.

Les itinéraires d'évacuation sont générés à partir des données externes ainsi que la distribution des personnes sur le territoire.

### **6.2.3 MODULE « PERTE DE PROTECTION »**

Ce module définit la perte de protection des bâtiments en fonction de la progression de l'inondation. L'estimation dépend du type de structure, du nombre d'étages, de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'onde (la problématique des débris transportés par le courant n'est pas intégrée dans LifeSim).

### **6.2.4 MODULE « ALERTE ET EVACUATION »**

Le module redistribue les personnes dans les refuges possibles jusqu'à ce que l'eau arrive. L'efficacité de l'évacuation dépend de plusieurs facteurs comme l'efficacité de l'alerte, la pyramide des âges de la population, le temps disponible et les itinéraires d'évacuation disponibles. L'évacuation peut se faire à pied ou en véhicule, ou bien il peut s'agir d'une simple élévation dans les refuges (immeubles, arbres, îles). Le processus d'évacuation cesse dans une zone dès que les conditions d'inondation sont réputées suffisantes pour entraîner des morts.

### **6.2.5 MODULE « ATTEINTE A LA VIE »**

L'espace (2D + 1D pour les bâtiments) est finalement segmenté en trois types de zones (zone de sécurité / zone intermédiaire / zone de hasard) et la PAR est distribuée dans ces zones grâce aux modules précédents. Une fonction de répartition de la mortalité (voir Figure 13) basée sur des données historiques est ensuite utilisée pour chaque zone. Pour le calcul déterministe seule la moyenne est utilisée (0.0002 pour la zone de sécurité / 0.1200 pour la zone intermédiaire / 0.9145 pour la zone de chance).

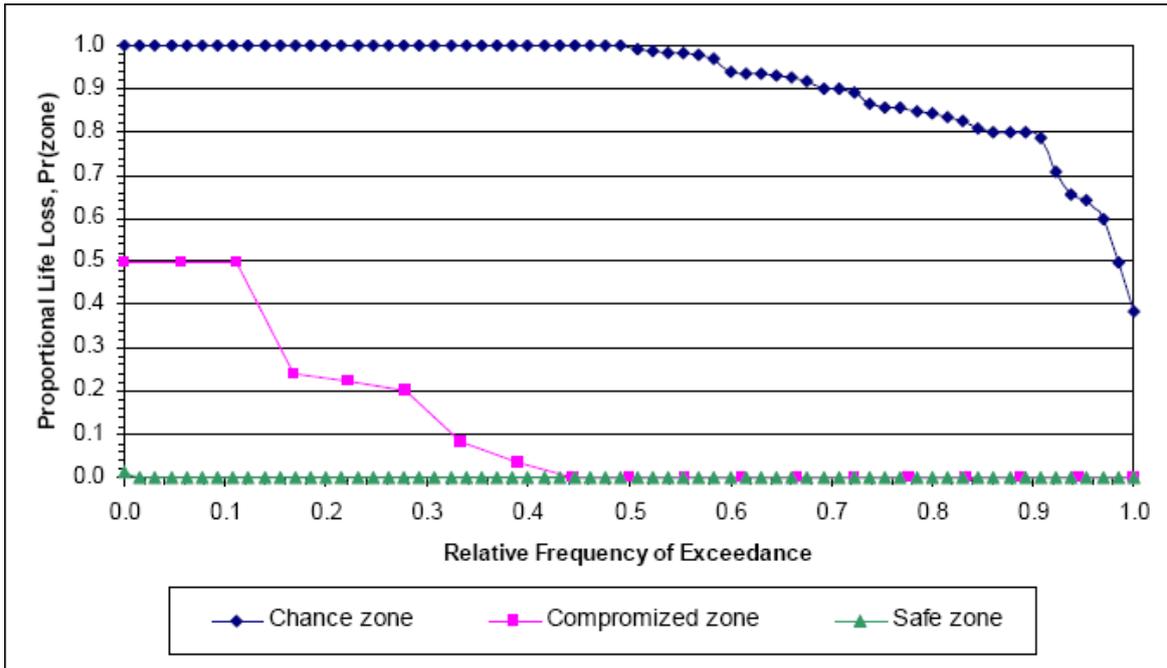


Figure 13 : Fonction de répartition de la mortalité en fonction des différentes zones (version originale tirée de [2.2])

## **7. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS PAR RAPPORT A LA PROBLÉMATIQUE EDD**

Cette partie constitue une synthèse des méthodes exposées en prenant le point de vue de la réglementation française relative aux ouvrages hydrauliques. L'application de telles méthodes d'estimation des conséquences en terme humain est confrontée à en effet plusieurs contraintes qui sont évoquées ci-après.

### **7.1 MOYENS A METTRE EN ŒUVRE ET QUALITE DE L'ESTIMATION**

Dans la réalisation des Etudes de Dangers, les différentes estimations sont souvent conduites avec des méthodes simples qui demandent rarement des moyens techniques importants. L'objectif de l'EDD étant notamment de balayer l'ensemble des risques possibles sur une installation, il serait impossible de réaliser une modélisation précise de chaque phénomène dangereux. Le résultat doit néanmoins être de qualité suffisante pour aider à la décision. Les deux paragraphes suivants font un point sur les méthodes empiriques et conceptuelles décrites dans ce rapport.

#### **7.1.1 QUALITE DE L'ESTIMATION**

Les modèles empiriques se basent le plus souvent sur des listes historiques d'accidents. Lorsque les modèles sont spécifiques aux barrages, le nombre de données historiques est très restreint et les cas peuvent être très différents les uns des autres. Il est alors difficile de baser un raisonnement statistique sur un échantillon si petit et aussi hétérogène dans le but de prévoir les conséquences de la rupture d'un autre barrage. Lorsque les modèles ne sont pas spécifiques aux barrages, les données peuvent être un peu plus nombreuses, mais il est difficile de savoir de quelle manière il est possible d'assimiler les différents phénomènes. En conclusion, les modèles empiriques consistent plus en une formalisation de données historiques plutôt qu'en une réelle étude statistique. Dans cette idée, la description d'une cinquantaine d'accidents réalisée par Graham 1999 [1.4] est de loin la plus intéressante et la plus aboutie. Néanmoins, nous ne recommandons pas d'utiliser ce genre de modèles dans le cadre de la prévision du nombre de morts dans les EDD<sup>11</sup>.

Les modèles conceptuels sont nés du rejet des modèles empiriques pour les raisons exposées ci-dessus. Ces modèles décomposent dans l'espace et dans le temps le phénomène global en actions élémentaires qui permettent de le définir complètement, en intégrant de nombreux paramètres. Contrairement aux lois macroscopiques des modèles empiriques, les lois des modèles conceptuels sont susceptibles d'être calibrées avec justesse. Il n'est cependant pas évident qu'aujourd'hui toutes les lois soient bien calibrées, surtout celles qui concernent les réactions humaines.

---

<sup>11</sup> Il faut rappeler d'ailleurs la remarque de Graham 1999 [1.4] qui mentionne que «l'estimation du nombre de morts dans le cas d'une rupture de barrage relève autant de l'art que de la science».

Nous n'avons pas testé les modèles existants et nous n'avons pas étudié comment sont calibrées les différentes lois, mais on peut raisonnablement penser que le résultat obtenu est de meilleure qualité que ceux obtenus grâce à des modèles empiriques.

Enfin, indépendamment du type de modèle, l'estimation des conséquences arrive en bout de chaîne et récupère donc l'ensemble des incertitudes des étapes précédentes. Dans un premier temps, il avait été prévu de regarder dans l'étude ce que devenait une incertitude sur le modèle d'estimation de l'onde de submersion dans le modèle d'estimation des conséquences. En réalité, cet exercice s'est révélé infaisable puisque l'incertitude se propage directement sur la PAR et dépend donc fondamentalement de la répartition de la population sur un site donné.

### **7.1.2 MOYENS A METTRE EN ŒUVRE**

Les modèles empiriques sont basés sur des données statistiques qui ont été consignées après les catastrophes et qui deviennent les paramètres d'entrée du modèle. Ces données sont souvent assez facilement accessibles a priori et les moyens à mettre en œuvre sont donc faibles pour alimenter le modèle. Le résultat est calculé de manière analytique ou grâce à des tableaux de valeurs, c'est-à-dire de manière quasi immédiate.

Les modèles conceptuels se basent sur de nombreux paramètres élémentaires et calculent un résultat grâce à des arbres logiques et différentes lois. L'utilisation est donc automatisée dans un logiciel, ce qui demande soit l'achat d'un tel logiciel (mais à notre connaissance aucun des deux modèles conceptuels n'est commercialisé) soit la conception d'un logiciel. D'autre part, l'utilisation d'un simulateur demande bien entendu une grande quantité de données à rassembler et à préparer, ce qui peut se traduire par une grande dépense de temps. Une telle mobilisation de moyens ne nous semble pas aujourd'hui en cohérence avec la philosophie actuelle de l'EDD. La commercialisation d'un logiciel simplifié et peu onéreux pourrait néanmoins rendre acceptable l'utilisation de modèles conceptuels dans les EDD.

### **7.1.3 RECOMMANDATIONS SUR L'OBJET DE L'ESTIMATION**

Etant donné les réflexions conduites dans les paragraphes précédents, il ne semble pas optimal de chercher à calculer un nombre de morts ou une proportion de morts. Les modèles simples d'utilisation donnent a priori des résultats peu précis et les modèles conceptuels semblent trop lourds et pas assez avancés pour être utilisés de manière courante dans les EDD.

Nous recommandons donc de s'arrêter au stade de l'estimation de la Population Assujettie au Risque comme le demande la réglementation<sup>12</sup>. Une discussion et des recommandations sont données dans le paragraphe 7.2.

D'autre part, la réglementation demande d'étudier la rupture de barrage mais également des scénarios intermédiaires comme l'ouverture intempestive d'une vanne. Les méthodes utilisant un modèle empirique spécifique aux barrages ne s'intéressent et ne sont valables que pour les phénomènes extrêmes de rupture de barrage et ne doivent donc pas être utilisées. Les modèles conceptuels sont, au contraire, techniquement capables de traiter toutes les situations. De la même manière que pour le cas de la rupture et pour les mêmes raisons, nous recommandons de s'arrêter au stade de la détermination de la PAR et de ne pas chercher à quantifier le nombre ou la proportion de morts d'autant plus qu'on ne dispose pas de la modélisation hydraulique qui est nécessaire au comptage.

## **7.2 SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS SUR L'ESTIMATION DE LA PAR**

Les méthodes exposées dans ce rapport suivent globalement les mêmes étapes pour arriver au résultat escompté et la plupart font donc intervenir le paramètre PAR. En revanche, toutes ne donnent pas d'indication quant à la manière de déterminer la PAR. Les méthodes conceptuelles déterminent la PAR de manière précise en fonction de la topographie, des données de recensement, de la carte d'inondation et des différents scénarios envisagés. Les deux méthodes françaises évoquées ont été construites selon la même philosophie que la réglementation et s'arrêtent donc à définir la PAR, tout comme la méthode ANCOLD et celle de l'Etat du Queensland. Ces différents exemples de méthodes, empiriques ou conceptuelles, ont permis de soulever plusieurs points intéressants sur le caractère spatio-temporel de la PAR. Nous donnons dans ce paragraphe des recommandations sur trois points :

- la prise en compte des variations temporelles de la PAR ;
- la segmentation spatiale de la PAR en fonction de son exposition au phénomène dangereux ;
- la manière de compter dans chaque configuration spatio-temporelle donnée.

---

<sup>12</sup> Il faut d'ailleurs ajouter que même si les méthodes vont en théorie jusqu'à l'estimation du nombre de morts, les utilisateurs s'arrêtent parfois à l'estimation de la PAR. Cette pratique a été rapportée pour la méthode McCann qui a été utilisée par le U.S. Army Corps Of Engineer.

### **7.2.1 PRISE EN COMPTE DES VARIATIONS TEMPORELLES DE LA PAR**

L'activité humaine, et donc la répartition des hommes sur le territoire, sont fortement influencées par le temps. Nous recommandons donc de réaliser plusieurs scénarios temporels. Le plus important nous semble être la différence entre le jour et la nuit, car les zones d'activité sont souvent bien différentes des zones résidentielles. Dans un secteur touristique, il peut également être intéressant de réaliser des scénarios différents en haute saison et en basse saison. En effet, il peut se trouver des configurations particulières de population très vulnérables comme des campings.

### **7.2.2 SEGMENTATION SPATIALE DE LA PAR EN FONCTION DE SON EXPOSITION AU PHENOMENE DANGEREUX**

Pour chaque configuration envisagée, il est intéressant de segmenter spatialement l'onde pour rendre compte de l'exposition de la PAR. La plupart des méthodes utilisent un critère binaire pour écarter du calcul la population se trouvant sous une certaine hauteur d'eau (30, 50 voire 60 cm). On peut également choisir des critères plus complexes et plus gradués. Ainsi dans la méthode développée par Ramsbottom, une échelle de 4 niveaux a été déterminée à partir d'un index D (voir 5.5.1) fonction de la hauteur d'eau, de la vitesse de l'eau, et des débris transportés. Nous recommandons donc d'utiliser un critère pour raffiner le comptage de la PAR. Le critère devrait idéalement se répartir sur une échelle à 3 ou 4 niveaux afin d'obtenir directement différents niveaux de zones à risques et de pouvoir compter la PAR pour chacune des zones. Des indications sur les critères de stabilité sont données en paragraphe 7.2.4.

### **7.2.3 COMPTAGE EFFECTIF**

Enfin, dans chaque configuration spatio-temporelle ainsi délimitée, le calcul de la PAR peut-être réalisée par plusieurs moyens :

- Utilisation des données de recensement ;
- Entretien sur place ;
- Comptage forfaitaire selon les différents types d'occupation des sols.

Pour le comptage forfaitaire des tables existent dans différentes références comme celle donnée pour information en annexe F.

Il serait intéressant de pouvoir diminuer la PAR en fonction des possibilités d'alerte et d'évacuation. Ces paramètres sont en effet ressortis comme particulièrement importants dans la problématique. Cet aspect fondamental est également repris dans la réglementation qui propose dans la circulaire de prendre en compte les personnes pouvant se mettre à l'abri. La méthode d'Ayyaswamy et Al, 1974, propose par exemple une fonction donnant le pourcentage de personnes évacuées en fonction du temps d'évacuation disponible (c'est-à-dire du temps entre l'alerte et l'arrivée de l'eau). Malheureusement cette fonction n'est apparemment pas basée sur des données historiques et est donc difficilement applicable.

## 7.2.4 CRITERES RELIANT PHENOMENES DANGEREUX ET ATTEINTES A LA PERSONNE

Dans la réglementation EDD pour les établissements industriels, le calcul de la PAR se fait pour chaque phénomène dangereux en fonction des distances associées aux effets thermiques, de surpression et toxiques pour des seuils fixés par la réglementation (effets létaux significatifs, effets létaux et effets irréversibles). Dans le cas du barrage, une partie des méthodes s'appuient de manière similaire sur des critères de stabilité des personnes dans un flux d'eau. Dans ce domaine, deux auteurs ont réalisé des tests de stabilité grandeur nature, avec des mannequins et des êtres humains qui ont fourni des séries de résultats intéressantes.

Les caractéristiques des expériences sont données dans le Tableau 5 et le Tableau 6. Les résultats sont illustrés en Figure 14 sous la forme d'une fonction de répartition de la stabilité des personnes en fonction du produit *hauteur x vitesse* de l'eau. En ordonnée est reporté le nombre d'expériences au cours desquelles le participant a été déstabilisé sur le nombre total d'expériences pour un produit *hauteur x vitesse* donné.

Référence	Nature du sol / température de l'eau	Vêtements et équipements de sécurité	Hauteur d'eau (m)	Vitesse (m/s)
Abt et al, 1989 [24]	Herbe, béton, acier, gravier. Eau entre 20 et 25 °C	Jeans et chemise, harnais, casque	0,42 – 1,2	0,36 – 3,05
Karvonen et al, 2000, [25] RESCDAM	Grille en acier glissante Eau à 16 °C	Combinaison de survie en Goretex Casque, corde de sécurité, poignées	0,3 – 1,1	0,6 – 2,75

*Tableau 5 : Paramètres des expériences grandeur nature de stabilité des personnes dans un flux d'eau (d'après [4])*

Référence	Participants	Poids (kg)	Taille (m)	Nombre d'expériences
Abt et al, 1989 [24]	20 personnes, hommes et femmes, 19-54 ans en bonne santé	41 – 91	1,52 – 1,91	6 sur mannequin 65 sur participants
Karvonen et al, 2000, [25] RESCDAM	7 personnes, homme et femme. Certains étaient des secouristes professionnels	48 - 100	1,6 – 1,95	38 sur participants

*Tableau 6 : Caractéristiques des participants lors des expériences grandeur nature de stabilité des personnes dans un flux d'eau (d'après [4])*

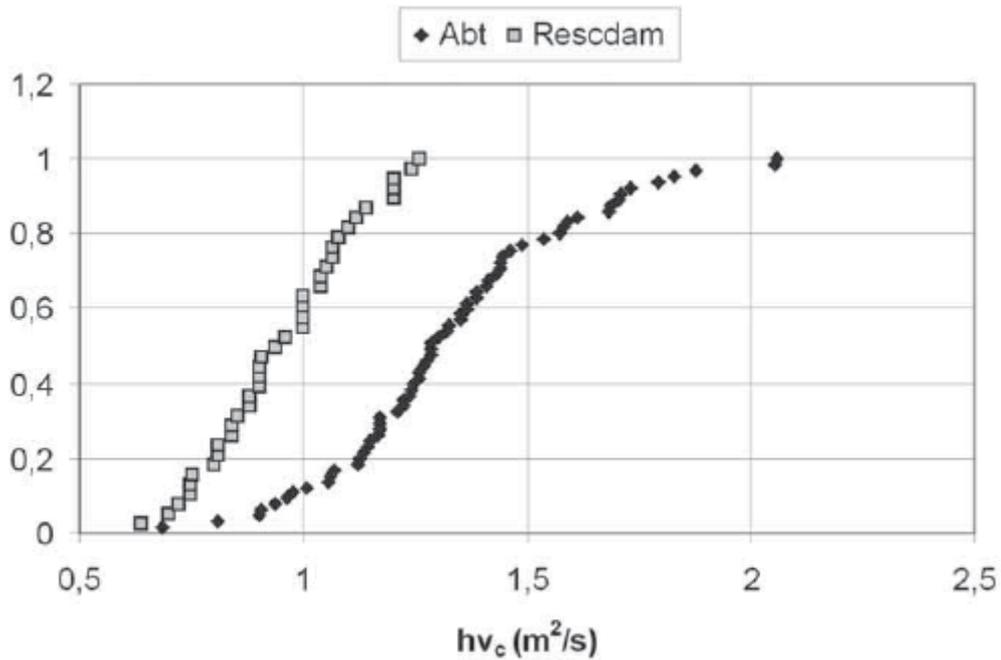


Figure 14 : Fonction de répartition du produit critique hauteur x vitesse d'après les données des expériences de Abt et Rescdam, (d'après [4])

Certains auteurs ont également réfléchi théoriquement au problème d'instabilité en modélisant l'équilibre mécanique d'un corps humain dans un écoulement fluide, comme Koshimura et al [9].

## **8. CONCLUSION**

Dans le cadre de la réglementation EDD pour les barrages, les conséquences en terme humain et de dommages aux biens doivent être quantifiés. Le présent rapport fait le point sur les méthodes existantes d'estimation des conséquences en terme humain. Quatre catégories de méthodes ont été différenciées : les méthodes non spécifiques aux barrages mais sur des thèmes relativement proches comme les inondations ou les tsunamis, les méthodes spécifiques aux barrages qui peuvent être empiriques, conceptuelles ou qui n'ont pour but que la détermination de la population potentiellement impactée (PAR).

Dans leur ensemble, les méthodes utilisant des modèles empiriques sont beaucoup plus simples à appliquer mais les résultats ont une assise statistique peu fournie et peu homogène. Les méthodes utilisant des modèles conceptuels donnent probablement de meilleurs résultats une fois calibrées. Ce calibrage et la préparation des données nécessaires aux modèles demandent par contre des moyens conséquents, sans aborder la problématique du développement de tels simulateurs.

Les méthodes vont en général plus loin dans l'estimation des conséquences que ce que demande la réglementation actuelle puisqu'elles ne s'arrêtent pas à l'estimation de la population potentiellement impactée mais proposent souvent une estimation du nombre de morts ou de la proportion du nombre de morts.

Des recommandations sur l'estimation de la population potentiellement impactée (PAR) sont également données dans la dernière partie.

Une note complémentaire à ce rapport (référéncée DRA-09-103165-11179A du 14/09/2009) présente des pistes possibles sur l'application de certains critères pour la détermination de la PAR dans les Etudes de dangers Barrages.



## **LISTE DES ANNEXES**

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe A	Liste de documents concernant les méthodes d'estimation des conséquences en terme humain	2
Annexe B	Liste de documents concernant les méthodes d'estimation des conséquences en terme économique	1
Annexe C	Indications pour l'estimation des conséquences économiques, sociales et environnementales, tirées du guide publié par le Comité Australien des Grands Barrages (ANCOLD)	6
Annexe D	« Tools For Researchers » Annexe, en anglais, de la référence bibliographique [2.1], comprenant notamment la liste des 94 variables du problème d'estimation du nombre de morts lors d'une rupture de barrage, identifiées par les auteurs	25
Annexe E	Tableaux de valeurs des coefficients a et b de la formule développé par Zhai et al, tirée de [8]	2
Annexe F	Table donnant le nombre moyen de personnes dans chaque type de bâtiment, tirée de [23]	2



## **ANNEXE A**

### **Liste de documents concernant les méthodes d'estimation des conséquences en terme humain**



# BIBLIOGRAPHIE

1.1	Brown, C.A., Graham, W.J. (1988) Assessing the threat to life from dam failure. <i>Water Resources Bulletin</i> 24:1303-1309.
1.2	Lee, R., Hu, P.S., Neal, D.M., Ogles, M.R., Sorensen, J.H., Trumble, D.A. (1986) Predicting loss of life from floods. <i>Oak Ridge National Laboratory Draft Report. Prepared for the Institute for Water Resources, U.S. Army Corps of Engineers.</i> 131 p.
1.3	DeKay, M.L., McClelland, G.H. (1993) Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood. <i>Risk Analysis</i> 13(2):193-205.
1.4	Graham, W.J. (1999) A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. U.S. <i>Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, Report no. DSO-99-06.</i> 44 p.
1.5	Reiter, P. (2001) Loss of life caused by dam failure, the Rescdam LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinäjoki. <i>Rescdam : 19-6-2001.</i> 48 p
1.6	FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2008) Risk Prioritization Tool for Dams Users Manual. 58 p.
1.7	Morris, M., Henry, H., Craig E. (2000) Risk and Reservoirs in the UK. <i>International seminar and workshop Seinäjoki, october 2-5, 2000.</i>
1.8	Lee, J.-S. (2002) Uncertainties in the predicted number of life loss due to the dam breach floods.
2.1	McClelland, D.M., Bowles, D.S. (2002) Estimating life loss for dam safety risk assessment – a review and new approach. <i>IWR report 02-R-3.</i> 420 p.
2.2	Aboelata, M., Bowles, D. S., McClelland, D. M. (2003) LifeSim : A model for estimating dam failure life loss. Draft report prepared for IWR and ANCOLD. 274 p.
3.1	Assaf, H., Hartford, D.N.D. (2002) A Virtual Reality Approach to Public Protection and Emergency Preparedness Planning in Dam Safety Analysis. <i>Canadian Dam Association (CDA) 2002 Annual Conference October 10, 2002, Victoria, Canada.</i>
3.2	Assaf, H., Hartford, D.N.D. (2001) Physically-based Modelling of Life Safety Considerations in Water Resource Decision-Making. <i>Proceedings of the EWRI World Water &amp; Environmental Resources Congress, May 20-24, 2001, Orlando, Florida, American Society of Civil Engineers, Washington D.C. 2001</i>
3.3	Hartford, D.N.D, Baecher, G.B. (2004) Risk and Uncertainty in dam Safety.
4.1	Duiser, J.A. (1989) Een verkennend onderzoek naar methoden ter bepaling van inundatieschade bij doorbraak, TNO report ref. 82-0644
4.2	Waarts, P.H. (1992) Method for Determining Loss of Life Caused by Inundation, September 1992. <i>TNO, The Netherlands (in Dutch).</i>
4.3	Vrouwenvelder, A.C.W.M., Steenhuis, C.M. (1997) Secondary Flood Defenses in the Hoeksche Waard, Calculation of the Number of Fatalities for Various Flood Scenarios. <i>TNO 97-CONR0332, The Netherlands (in Dutch).</i>
4.4	Jonkman, S.N. (2001) Overstromingsrisico's: een onderzoek naar de toepasbaarheid van risicomaten. <i>Msc. Thesis Delft University of Technology</i>
4.5	Jonkman, S.N. (2007) Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and applications. <i>PhD Thesis. Delft University of Technology</i>
5.1	Circulaire DPPR/SEI2/CB-06-0388 du 28/12/06 relative à la mise à disposition du guide d'élaboration et de lecture des études de dangers pour les établissements soumis à autorisation avec servitudes.
5.2	IFEN (2008) Observation des enjeux. Estimation des populations et des logements en zone inondable.
6.1	Brown. A. (2004) Interim Guide to Quantitative risk assessment for UK Reservoirs.
6.2	Supplement N°1 to Interim Guide to Quantitative risk assessment for UK Reservoirs. (2006)
6.3	Ramsbottom, D., Floyd, P., Penning-Rowsell, E. (2003) <i>DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs). Flood report FD2317TR risks to people – phase 1, R&amp;D Technical</i>
7	ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams) (2000) Guidelines on Assessment of the Consequences of Dam Failure.

8	Zhai, G., Fukuzono, T., Ikeda, S. (2006) An Empirical Model of Fatalities and Injuries Due to Floods in Japan. <i>Paper No. 04155 of the Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)</i> .
9	Koshimura, S., Katada, T., Mofjeld, H.O., Kawata, Y. (2006) A method for estimating casualties due to the tsunami inundation flow, <i>Natural Hazards Vol. 39 pp. 265-274</i>
10	CDMC (Central Disaster Management Council) (2003) Damage estimation method for the Tonankai and Nankai Earthquakes, (in Japanese) <a href="http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/10/sankou_siryou.pdf">http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/10/sankou_siryou.pdf</a>
11	Tsuchiya, Y., Kawata, Y. (1981) Risk to life, warning systems, and protective construction against past storm surges in Osaka Bay, <i>Journal of Natural Disaster Science Vol.3, No.1 pp. 33-56</i>
12	Mizutani, T. (1996) Causative Factors of Typhoon Disasters and Secular Changes in the Damage Ratio During 1946-1995. <i>Geographical Review of Japan, Ser. A 69(9):744-756</i> .
13	Boyd, E., Levitan, M., Van Heerden, I. (2005) Further Specification of the Dose-Response Relationship for Flood Fatality Estimation. <i>Paper presented at The US-Bangladesh Workshop On Innovation in Windstorm/Storm Surge Mitigation Construction. National Science Foundation and Ministry of Disaster &amp; Relief, Government of Bangladesh. Dhaka, Bangladesh, December 19-21, 2005.</i>
14	Ayyaswamy, P., Hauss, B., Hseih, T., Moscati, A., Hicks, T.E., Okrent, D. (1974) Estimates of the risks associated with dam failure. <i>School of Engineering and Applied Science, University of California, Los Angeles, California. 375 p.</i>
15	Friedman, D.G. (1975) Computer simulation in natural hazard assessment. <i>Institute of Behavioral Science, University of Colorado, Boulder, Colorado. 194 p.</i>
16	Petak, W.J., Atkisson, A. A. (1982) Natural hazard risk assessment and public policy, anticipating the unexpected. <i>Springer-Verlag, Inc., New York. 489 p.</i>
17	McCann, M.W.Jr., Franzini, J.B., Kavazanjian, E.Jr., Shah, H.C. (1985) Preliminary safety evaluation of existing dams. <i>Vol. 1 and 2. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering. Report no. 69 and 70.</i>
18	Paté-Cornell, E.M., Tagaras, G. (1986) Risk costs for new dams: Economic analysis and effects of monitoring. <i>Water Resources Research 22(1):5-14.</i>
19	Sugimoto, T., Murakami, H., Yozuki, K., Nishikawa, K., Shimada, T. (2003) A human damage prediction method for tsunami disasters incorporating evacuation activities, <i>Natural Hazards Vol.29 No. 3 pp. 585 – 600</i>
20	Glickman, T.S. (1986) A methodology for estimating time-of-day variations of the size of population exposed to risk.
23	Queensland Government (2002) Guidelines for failure impact assesment of water dams.
24	Abt, S. R., Wittler, R. J., Taylor, A., Love, D.J. (1989) Human stability in a high flood hazard one. <i>Water Resources Bulletin 25(4):881-890.</i>
25	Helsinki University of Technology (2001) Rescdam : The use of physical models in dam-break flood analysis

 Document étudié dans l'étude

 Document mentionné dans l'étude, disponible à l'achat

 Document mentionné dans l'étude, indisponible à l'achat ou dans une langue autre que l'anglais ou le français

## **ANNEXE B**

### **Liste de documents concernant les méthodes d'estimation des conséquences en terme économique**



# BIBLIOGRAPHIE

1	ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams) (2000) Guidelines on Assessment of the Consequences of Dam Failure.
2	De Lotto, P., Testa, G. Risk assessment : a simplified approach of flood damage evaluation with the use of GIS.
3	De Lotto, P., Testa, G. Dam break risk management and socio economic impact : a simplified method of flood damage estimation.
4	Walker, G., AON (1999) Flood Loss Estimation – It Can Be Done.
5	US Army Corps of Engineers, Risk based analysis for flood damage reduction studies. <i>Engineer Manual 1110-2-1619</i>
6	US Army Corps of Engineer. National Economic Development Procedures Manual - Urban Flood Damage ( <i>volume 1 et 2</i> ).
7	Hubert, G., Ledoux, B. (1999) Le coût du risque. L'évaluation des impacts socio économiques des inondations.
8	National Technical Information Service (1996). Analysis of Non-residential Content Value and Depth-Damage Data for Flood Damage Reduction Studies. <i>U.S. Department of Commerce, USA</i>
9	Schwarz, J., Maiwald, H. (2008) Damage and loss prediction model based on the vulnerability of building types.
10	Nerning, C., Viljoen, M.-F., Du Plessis, L.-A. (2000) Loss functions for sugar-cane : depth and duration of inundation as determinants of extent of flood damage.
11	Smith D.I., Handmer, J. Residential flood insurance - the implications of Flood Plain Management Policy. <i>Water Research Foundation of Australia</i>
12	Yangtze River Flood Control and Management Project (2003) Literature review for the development of a socio economic impact assesment procedure to be applied to the flooding of Quianlang Hu Detention Basin, Hunan Province, China.
13	Smith, D.-I. (1994) Flood damage estimation - A review of urban stage-damage curves and loss functions.
14	Lekuthai, A., Vongvisessomjai, S. (2001) Intangible Flood Damage Quantification.
15	Nascimento, N., Baptista, M., Silva, A., Léa Machado, M., Costa de Lima, J., Gonçalves, M., Silva, A., Dias, R., Machado, É. (2006) Flood-damage curves : Methodological development for the Brazilian context.
16	Dutta, D., Herath, S., Musiaka, K. Direct flood damage modeling towards urban flood risk management.

La bibliographie proposée concerne les dommages socio-économiques liés aux inondations. Cette liste n'est pas le fruit d'une recherche bibliographique aboutie et doit plutôt être considérée comme un ensemble de pistes. D'une manière générale, le nombre de publications, de guides et de livres sur le sujet semble bien plus important que pour les conséquences humaines. La littérature reportée est volontairement internationale et les pays suivants sont représentés :

Afrique du Sud, Allemagne, Australie, Brésil, Chine, Etats-Unis, France, Italie, Japon, Thaïlande.

De manière synthétique, une des méthodes d'estimation les plus répandues consiste à calculer la valeur totale des biens matériels et immatériels menacés par l'inondation puis d'appliquer une fonction permettant de déterminer le pourcentage de dommages en fonction de la valeur d'une caractéristique de l'inondation. La caractéristique la plus commune est la hauteur d'eau, mais certains auteurs considèrent d'autres caractéristiques comme la vitesse du fluide ou bien la durée de l'inondation. Les fonctions établies sont spécifiques à chaque pays et à chaque enjeu considéré. On peut ainsi trouver des fonctions pour les quartiers résidentiels, les zones industrielles, les petits commerces et pour l'agriculture.



## **ANNEXE C**

**Indications pour l'estimation des conséquences économiques, sociales et environnementales, tirées du guide publié par le Comité Australien des Grands Barrages (ANCOLD)**



**TABLE 2- SEVERITY OF DAMAGES AND LOSSES**

*Refer to Appendix D for an example of the selection of the level of severity*

DAMAGE AND LOSS	ESTIMATE	SEVERITY LEVEL			
		Negligible	Minor	Medium	Major
<b>ESTIMATED COSTS</b>					
Residential					
Commercial					
Infrastructure					
Dam repair or replacement cost					
Provision of temporary services by owner					
Clean up					
<i>Estimated cost severity level =</i>					
<b>SERVICE AND BUSINESS RELATING TO THE DAM</b>					
Importance to the system and need to replace the dam					
Effect on services provided by owner					
Practicality of replacing the dam					
Community resistance to replacement					
Effect on continuing credibility					
Political implications					
Impact on financial viability					
Value of water in storage					
<i>Service and business damage and loss severity level =</i>					
<b>SOCIAL</b>					
Loss of services to the community					
Public health adversely affected					
Cost of emergency management					
Dislocation of people					
Dislocation of businesses					
Employment affected					
Production affected					
Post disaster trauma and stress					
Injured and hospitalised					
Loss of heritage/cultural					
Loss of reservoir recreational facility					
Loss of other recreational facilities					
<i>Social damage and loss severity level =</i>					
<b>NATURAL ENVIRONMENT</b>					
Area of impact					
Vegetation and forest damage					
Duration of impact					
Significant factors					
Ecological effects					
Habitat units					
<i>Natural environment damage and loss severity level =</i>					
<i>Highest damage and loss severity level =</i>					

**EXAMPLE OF THE SELECTION OF THE SEVERITY OF DAMAGE AND LOSS**  
 (This example may need to be altered to reflect the nature of the dam owners organisation and the community)

**1. ESTIMATED COSTS**

TYPE	NEGLIGIBLE	MINOR	MEDIUM	MAJOR
Residential	Not expected	Damage to one to three houses.	Destroy 4 to 49 houses or damage a number.	>50 houses destroyed.
Commercial	<\$10 000	\$10 000 to \$1M	\$1M to \$10M	More than \$10M
Infrastructure	<\$10 000	\$10 000 to \$1M	\$1M to \$10M	More than \$10M
Dam repair or replacement cost*	<\$100 000	\$100 000 to \$10M	\$10M to \$100M	More than \$100M
Provision of temporary services to replace those provided by dam	<\$10 000	\$10 000 to \$1M	\$1M to \$10M	More than \$10M
Clean up within the flood affected zone	<\$10 000	\$10 000 to \$1M	\$1M to \$10M	More than \$10M

\* It is expected that dam costs would be relatively higher than commercial and infrastructure for an equivalent severity.

**Explanatory Notes for Estimated Costs**

General	The costs are indicative only. For future reference the costs are in 1998 values and should be updated according to inflation index.
Residential	Total number of houses affected, some destroyed and others damaged.
Commercial	Including businesses and agriculture. eg retail, manufacturing, resources, agricultural
Infrastructure	These severities could be assessed in terms of the average annual wage. Such as roads, railways, power, communications, gas, water supply, sewerage, irrigation, drainage, schools, hospitals, community facilities and public buildings. May be expressed in terms of annual cash flow or turnover.
Dam Replacement and repair cost	Repairs to the embankment or wall and appurtenant works which will return the dam to its previous level of service.
Provision of temporary services previously provided/supplied by the dam	Provision of pipelines, pumping stations, etc. (eg water supply, sewerage, drainage, irrigation, power, flood control, recreation)

**EXAMPLE OF THE SELECTION OF THE SEVERITY OF DAMAGE AND LOSS**  
 (This example may need to be altered to reflect the nature of the dam owners organisation and the community)

**2. SERVICE AND BUSINESS RELATING TO THE DAM**

TYPE	NEGLIGIBLE	MINOR	MEDIUM	MAJOR
Importance to the business	No effect	Restrictions needed during dry periods	Restrictions needed during peak days and peak hours	Essential to maintain supply
Effect on services provided by the owner	Services can easily be replaced	Minor difficulties in replacing services	Reduced services are possible with reasonable restrictions. About 80% of full supply for some months	Services supplied by the dam are essential and cannot be provided from another source. Severe restrictions would be applied for at least one year.
Practicality of replacing the dam	No impediment	Some impediment	Replace at a high impact on the community	Impossible to replace.
Community resistance to replacement				
Effect on continuing credibility	None expected	Some reaction but short lived	Severe widespread reaction	Extreme discontent, high media coverage, long term.
Political implications				
Impact on financial viability	None expected	Able to absorb in one financial year.	Significant with considerable impact in the long term.	Severe to crippling in the long term.
Value of water in the storage	Assessed by the owner in relation to the business			

**EXAMPLE OF THE SELECTION OF THE SEVERITY OF DAMAGE AND LOSS**  
 (This example may need to be altered to reflect the nature of the dam owners organisation and the community)

Explanatory Notes for Service and Business Relating to the Dam	
Importance to the business	Loss of a storage is likely to affect the service provided to some degree.
Effect on the services provided by the owner	Water supply, power or recreational facility is no longer available or disrupted to a proportion of the community supplied by the agency.
Practicality of replacing the dam	This is a measure of the physical difficulty of replacing the dam.
Community resistance to a replacement	Adverse community pressure.
Effect on continuing credibility	Standing or reputation of the organisation in the community.
Political implications	Relationship between the dam owner and local, state and federal legislature.
Impact on financial viability	Economic and legal liability; ability to meet the costs of repairs and damage; and ability to meet claims from others.
Value of water in storage.	Loss of income from the loss of the stored water.

## EXAMPLE OF THE SELECTION OF THE SEVERITY OF DAMAGE AND LOSS

(This example may need to be altered to reflect the nature of the dam owners organisation and the community)

## 3. SOCIAL

TYPE	NEGLIGIBLE	MINOR	MEDIUM	MAJOR
Loss of service to the community	None expected	<10 persons affected	11 to 100 persons affected	>100 persons affected
Public health adversely affected	No effect	<100 people affected for one month	100 to 1000 people affected for one month	>1000 people affected for one month
Cost of emergency management	None expected	<100 person days	100 to 1000 person days	>1000 person days
Dislocation of people	No effect	<100 person months	100 to 1000 person months	>1000 person months
Dislocation of businesses	No effect	<20 business months	20 to 200 business months	>200 business months
Employment affected	No jobs lost	<10 jobs lost	10 to 100 jobs lost	>100 jobs lost
Production affected	None expected	Regional output affected by <10%	Regional output affected by <30%	Regional output affected by >30%
Post disaster trauma and stress	None expected	<100 person months	100 to 500 person months	>500 person months
Injured and hospitalised	Nil	<10	10 to 50	>50
Loss of Heritage	None expected	Assessment based on community consultation		
Loss of recreation facility	None expected	Local facility	Regional developed facility	National facility

**EXAMPLE OF THE SELECTION OF THE SEVERITY OF DAMAGE AND LOSS**

(This example may need to be altered to reflect the nature of the dam owners organisation and the community)

**Explanatory Notes for Social**

Loss of services to the community	Sewerage systems blocked by debris and gas / power / communications and access disrupted or damaged at river crossings.
Public health adversely affected	Effect on public health of loss of water supply, sewerage and drainage.
Cost of the emergency management	Police, Emergency Services and volunteers will incur a cost, both direct and indirect.
Dislocation of people	People whose homes are destroyed or damaged will need to be rehoused or billeted for various times. There may be broken families and marriages.
Dislocation of businesses	Businesses will be prevented from trading in the short term and may be affected in the long term.
Employment affected	Loss of employment.
Production affected	Lost production including manufacturing and agriculture as a result of flood damage and/or loss of water supply until full reinstatement of the water supply is achieved(eg retail, services, manufacturing, resources, agriculture, loss of a private dam)
Post disaster trauma and stress	Stress on people who are directly and indirectly involved will affect them in the short term and in some cases in the longer term. Counselling may be needed. Staff required for victim support. Victims may include those not directly affected.
Injured and Hospitalised	The number of people who may need to be hospitalised
Loss of Heritage	Historic sites, both pre and post European settlement.
Loss of reservoir recreational facility	Many communities rely, to various degrees, on bodies of water for boating, fishing and other recreational aspects, including visual relief.
Loss of other recreational facility	Other recreational facilities may be located downstream of the reservoir, eg golf course, sports grounds.

## **ANNEXE D**

**« Tools For Researchers » Annexe, en anglais, de la référence bibliographique [2.1], comprenant notamment la liste des 94 variables du problème d'estimation du nombre de morts lors d'une rupture de barrage, identifiées par les auteurs**



## Appendix D

### Tools for Researchers

#### Alphabetical list of variables

Table D.1. An alphabetical list of variables

Variables		
A	La	Qb
Ac	Lcoz	Qp
Ah	Lcz	R
B	Ldr	Ret
Bpar	Le	Rf
Bt	Lh	Rr
Ch	Lidr	Sc
Coh	Lin	Schvq
Coz	Linf	Sh
Cozd	Ln	Sz
Cz	Lnf	Szd
Czd	Location-Deaths	T
D	Lpcz	Td
Dd	Ls	Tpar
De	Lsw	Ts
Det	Lsz	Tw
Dt	M	Ty
Dv	Ml	V
E	O	Vol
Ef	P	W
Eparj	Par	We
F5	Par <sub>i</sub>	Wt
Fd	Pcz	Wtavg
Flt	Pczd	Wte
Fm	Pr	Wti
Fp	Prcoz	Wtpf
Fpar	Prcz	Wtpof
Ft	Prpcz	Ww
Gf	Prsz	Wwr
H	Psh	Zd
Hp	Pt	
L	Ptpar	

Summary reference table

Table D.2 lists each variable alphabetically, followed by its name, categorical breakdown, tips for accurate coding, and appropriate units in both the SI and English systems. The letter *p* represents the unit *persons*, living or dead; *bldg* represents buildings, and *u* indicates that a variable is unitless. Under coding, *wrt* is shorthand for *with respect to*. Ordinal variables are coded according to a subset of the following sequence: **N** = None, **L** = Low, **M** = Medium or Moderate, **H** = High, **V** = Very High, and **E** = Exceptionally High.

Explanation of variables

During event characterization, it was invaluable to have a concise, single-spaced summary of the definitions found in Chapter V, with tips on how to code the variables consistently. For the benefit of future reserachers, this working document has been reproduced here in its original form. Phrases have been left as incomplete sentences and it has not been reformatted to fit the style in the body of the thesis because these changes would misrepresent its historic form, reduce its value as a concise working reference, and reduce its usefulness as a research aidthe only reasons for its inclusion in this appendix.

Populations at risk

*Population at Risk (Par)*

Historic: "The number of people that were evacuated or the number of people that would have been evacuated had there been any warning." (DeKay and McClelland, 1993, p.196). Or those likely to have encountered flooding that could have posed some reasonable threat.

1. Cutoff at extreme edge of flooding: canyon or little flow dispersal.  $V > 3$  fps at 1 ft; lateral slope  $> 0.01$ .
2. Cutoff at 1.5 ft of flooding: leisurely flood/backwater.  $V < 0.5$  fps at 2 ft.

Table D.2. Alphabetical reference table of variables (see Chapter V for detailed descriptions)

Symbol	Name	Coding	SI units	Eng. units
A	Area of Final Breach	Measures orthogonal to final flow	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>
Ac	Attendant Circumstances	Wrt the IMPACT Ac had on Wt, E, R, L, or other variables: <b>N, L, M, H</b>	u	u
Ah	Aerated Haven	Pocket of protection when building nearly destroyed.	u	u
B	Breadth of the Dam	Top width	m	ft
Bpar	Basis of Par	Is Par based on <b>Pre</b> -evacuation or <b>Post</b> -evacuation, regarding a preliminary wave prior to failure?	u	u

Table D.2. Continued

Symbol	Name	Coding	SI units	Eng. units
Bt	Building Types (by %)	<b>N</b> = None; <b>T</b> = tents; <b>Sh</b> = shacks or flimsy buildings; <b>M</b> = mobile homes or RVs; <b>R</b> = residential homes; <b>C</b> = commercial; <b>H</b> = commercial over 1 story; <b>Lm</b> = hospitals, nursing homes, elem. schools, or other buildings with less mobile populations.	bldg	bldg
Ch	Chance Haven	Tenuous refuges reached by chance.	u	u
Coh	Compromised Haven	Psh and Sh.	u	u
Coz	Compromised Zone	Roughly central 80% of Coh in terms of severity of flooding.	u	u
Cozd	Compromised Zone Density	Number from Tpar <sub>i</sub> likely to be in a compromised zone.	u	u
Cz	Chance Zone	All Ch, the open flood, and underwater.	u	u
Czd	Chance Zone Density	Number from Tpar <sub>i</sub> likely to be in a chance zone.	u	u
D	Depth	Deepest location potentially encountered by a member of Par <sub>i</sub> .	m	ft
Dd	Damage and Destruction	List # of buildings destroyed, severely damaged, and slightly damaged by category.	bldg	bldg
Dev	Development (Degree of Urbanization)	<b>N</b> = none, <b>L</b> = small town, <b>M</b> = suburban, <b>H</b> = highly urbanized.	u	u
Det	Detectability	<b>N</b> = no signs of trouble; <b>L</b> = monitor wouldn't anticipate failure; <b>M</b> = alter operation, but don't expect failure this year; <b>H</b> = failure not unlikely if no action; <b>V</b> = failure imminent and not readily avoided.	u	u
Dt	Dam Type	Description: <b>N</b> = none, <b>E</b> = earthen, <b>R</b> = rock fill, <b>M</b> = masonry, <b>C</b> = concrete gravity, <b>A</b> = concrete gravity arch.	u	u
Dv	Destructive Velocity	$(Q_p - Q_b)/W$ . Dv can be $Dv_{min}$ , $Dv_{max}$ , or $Dv_{avg}$ depending on the choice of W.	m <sup>2</sup> /s	ft <sup>2</sup> /s
E	Ease of Evacuation = avg. surplus evacuation time	See equation under the definition.	min	min
Ef	Evacuation Nonsuccess Factor	$Ef = Tpar_i/Par_i$ .	u	u
Epar <sub>i</sub>	Evacuation subPar		p	p
F <sub>5</sub>	Forcefulness coded using five even increments	<b>L</b> = (0 - 0.2), <b>M</b> = (0.2 - 0.4), <b>H</b> = (0.4 - 0.6), <b>V</b> = (0.6 - 0.8), <b>E</b> = (0.8 - 1.0)	u	u

Table D.2. Continued

Symbol	Name	Coding	SI units	Eng. units
Fd	Forcefulness coded dichotomously	Based on a qualitative guess at Fp, Fd is coded as 0 or 1 (1 for Fp $\geq 0.2$ )	u	u
Flt	Flood Type	<b>D</b> = dam failure, <b>Dy</b> = dyke failure, <b>Ff</b> = flash flood, <b>F</b> = flood, <b>Ts</b> = tsunami or tidal wave, <b>S</b> = sea surge, <b>H</b> = hurricane (deaths not limited to flood consequences), <b>Gb</b> = glacier burst, <b>O</b> = other (such as water tower or storage tank bursting)	u	u
Fm	Failure Mode	<b>I</b> = internal: <b>Ip</b> = piping, <b>Ie</b> = embankment failure: sliding, overturning, foundation failure, or blowout with normal water levels; <b>F</b> = flooding: <b>F</b> = flooding apart from dam failure, <b>Ff</b> = flash flood, <b>Ff/D</b> = dam failure contributes little volume to a flash flood, <b>Fo</b> = overtopping or spillway washout; <b>Fe</b> = embankment failure: slumping, sliding, overturning, foundation failure, or blowout during overtopping or higher-than-design reservoir elevations; <b>S</b> = seismic failure: <b>Sp</b> = piping or other gradual development following an earthquake, <b>Se</b> = a rapid embankment failure during or shortly after an earthquake;	u	u
		<b>G</b> = gate failure not leading to dam breach; <b>L</b> = landslide not leading to dam breach.		
Fp	Forcefulness coded as a proportion	Fp = (residences seriously damaged or destroyed)/(all residences with any damage)	u	u
Fpar	Forcefulness defined in terms of all habitable structures and Par <sub>i</sub>	Fpar = (habitable structures severely damaged or destroyed)/(Par <sub>i</sub> ); habitable means residences, not businesses	bldg/p	bldg/p

Table D.2. Continued

Symbol	Name	Coding	SI units	Eng. units
Ft	Fatality Type	Quantify each, when possible: <b>N</b> = none; <b>C</b> = campers, riverside recreationists; <b>W</b> = waders and swimmers; <b>B</b> = boaters and rafters; <b>L</b> = boaters or swimmers on a lake; <b>E</b> = employees working at the dam; <b>Af</b> = auto-related; <b>Aa</b> = auto accident; <b>D</b> = general drowning in town; <b>Sf</b> = slope failure at dam; <b>O</b> = other non-drowning; <b>U</b> = Unknown mix.	u	u
Gf	Goodness of Fit	Variance in risk → spatial homogeneity wrt the river: <b>L, M, H, V</b>	u	u
H	Height of the Dam		m	ft
Hp	Height of Reservoir Pool at Failure	Measured in relation to the height of the dam, regardless of siltation.	m	ft
L	Life Loss (Loss of Life, LOL)		p	p
La	Adjusted Life Loss		p	p
Lcoz	Life Loss in the Compromised Zone		p	p
Lcz	Life Loss in the Chance Zone		p	p
Ldr	Life Loss Given Dam Removal		p	p
Le	Expected Life Loss		p	p
Lh	Historic Life Loss		p	p
Li <sub>dr</sub>	Incremental Life Loss (using Ldr)		p	p
Li <sub>n</sub>	Incremental Life Loss (using Ln)		p	p
Li <sub>nf</sub>	Incremental Life Loss (using Ldf)		p	p
Ln	Natural Channel Life Loss <i>or</i> Never a Dam Life Loss		p	p
Lnf	No Failure Life Loss		p	p
Locations of Deaths	Locations of deaths		u	u
Lpcz	Life Loss in the Chance Zone		p	p
Ls	Loss of Shelter	Percent of buildings in each category: <b>L</b> = minor structural damage with flooding below 1 ft of first floor ceiling; <b>M</b> = major structural damage; <b>H</b> = complete submergence or destruction; <b>Mh</b> = uncertain whether M or H.	bldg	bldg
Lsw	Weighted Loss of Shelter	See Chapter V	u	u
Lsz	Life Loss in the Safe Zone		p	p

Table D.2. Continued

Symbol	Name	Coding	SI units	Eng. units
M	Magnitude of Loading	Description and code: <b>N</b> = none (sunny-day failure), <b>L</b> (expected every few years), <b>M</b> (once every 5-15 years), <b>H</b> (once every 15-50 years), <b>V</b> (once every 50-100 years), <b>E</b> (rarer than 1/100 years)	varies	varies
MI	Magnitude of Local Loading	Same as M.	varies	varies
O	Outdoors	<b>I</b> = indoors (winter, work hours, night); <b>O</b> = outdoors (summer, recreationists, campgrounds)	u	u
P	Proportion of Life Loss	$P_i = L_i/Par_i$	u	u
Par	Population at Risk		p	p
Par <sub>i</sub>	Subpopulation at Risk		p	p
Pcz	Pseudo-Chance Zones	Buildings for which it is uncertain whether will be destroyed, float away, or experience very major damage.	u	u
Pczd	Pseudo-Chance Zone Density	Number from Tpar <sub>i</sub> likely to be in a pseudo-chance zone.	u	u
Pr	Preparedness	<b>N</b> = unaware; <b>L</b> = aware, but don't think serious; <b>M</b> = alert for or experienced in evacuation; <b>H</b> = expecting to evacuate and steps	u	u
Prcoz	Proportion of Lives Lost in the Compromised Zone		u	u
Prcz	Proportion of Lives Lost in the Chance Zone		u	u
Prpcz	Proportion of Lives Lost in the pseudo-Chance Zone		u	u
Prsz	Proportion of Lives Lost in the Safe Zone		u	u
Psh	Pseudo-Safe Haven	A safe haven that drifts down stream less than 300 ft.	u	u
Pt	Par Type	The surroundings of a Par <sub>i</sub> , tagged with percents when mixed. <b>C</b> = campers, including recreationists near the river.	u	u

Table D.2. Continued

Symbol	Name	Coding	SI units	Eng. units
		<b>W</b> = wade fishermen, swimmers, etc. <b>B</b> = boaters and rafters. <b>L</b> = boaters and swimmers on a lake. <b>E</b> = employees working at the dam. Note, it may be desirable to reclassify this Pt as D, W, or another overlapping category. <b>Af</b> = motorists. <b>T</b> = those on trains. <b>D</b> = in or near buildings and general drowning deaths in town. <b>U</b> = unknown mix. Whenever possible, subPar should be broken down into pure Pt100%.		
Ptpar	Proportion of the Threatened Population	Proportion of the Threatened Population that dies	u	u
Qb	Bankfull Volumetric Flow Rate		cms	cfs
Qp	Peak Volumetric Flow Rate		cms	cfs
R	Maximum Rise Rate (of the flood wave)	Quantify numerically or: <b>M</b> = moderate (out walk), <b>H</b> = rapid (need rapid action), <b>V</b> = very rapid (hard or impossible to outpace), <b>Ww</b> = wall of water (quantify with Ww).	m/min	ft/min
Ret	Representative Evacuation Time	Code as 2, 15, 45, 120, 240 or more precisely if data permits (see chart above).	min	min
Rf	Rate of Failure	Not truly a rate: the minutes for the most rapid 80% of the breach.	min	min
Rr	Rescue Resources	<b>N</b> = none; <b>L</b> = limited (hand tools); <b>M</b> = modern (urban, post 1950); <b>H</b> = high (abundant extras)	u	u
Sc	Sensory Clues	Wt based on sensory detection of the flood.	min	min
Schvq	Striking Characteristics and Valuable Quotations	Insightful narrative, quotations, and a summary of distinctions. Wrt the overall fit of the variable set: <b>L</b> = low, <b>H</b> = high.	u	u
Sh	Safe Haven	A refuge where death is rare.	u	u
Sz	Safe Zone	Safe havens and mildly compromised havens	u	u
Szd	Safe Zone Density	Number from Tpar <sub>i</sub> likely to be in a safe zone.	u	u
T	Summary of mo/day/yr, hr, and day of week	List dates & times, narrative.	u	u
Td	Time of Day	<b>N</b> = night (most people are asleep; 11:30 PM - 6:00 AM);	u	u

Table D.2. Continued

Symbol	Name	Coding	SI units	Eng. units
		<b>S</b> = separation (most families are separated by school or work; 8:00 AM - 6:00 PM on weekdays); <b>H</b> = home (most families are together; 6:00 - 8:00 AM, 6:00 - 11:30 PM; weekends, holidays, or $Par_i$ dominated by recreationists and day hours).		
<b>T<sub>par</sub></b>	Threatened Population	$Par$ present when flood arrives.	<b>p</b>	<b>p</b>
<b>T<sub>s</sub></b>	Time of Season	<b>S</b> = summer (May - October), <b>W</b> = winter (November - April)	<b>u</b>	<b>u</b>
<b>T<sub>w</sub></b>	Time of Week	<b>Wend</b> = weekend; <b>Wday</b> = weekday	<b>u</b>	<b>u</b>
<b>T<sub>y</sub></b>	Time of Year (month)	1 = Jan.; 12 = Dec.	<b>u</b>	<b>u</b>
<b>V</b>	Peak Velocity at $Par_i$	May be wave travel speed.	<b>m/s</b>	<b>ft/s</b>
<b>Vol</b>	Volume of Release		<b>m<sup>3</sup></b>	<b>acre-ft</b>
<b>W</b>	Maximum Flood Width at $Par_i$	$W = W_{max}$ . Alternatively, one can use $W_{t_{min}}$ or $W_{t_{avg}}$ .	<b>m</b>	<b>ft</b>
<b>We</b>	Warning Effectiveness	<b>N</b> (no official warning), <b>L</b> (< 50% get and believe timely warning), <b>M</b> (up to 90% get and believe timely warning), <b>H</b> (nearly complete evacuation before flood wave arrives).	<b>u</b>	<b>u</b>
<b>W<sub>t</sub></b>	Warning Time		<b>min</b>	<b>min</b>
<b>W<sub>t<sub>avg</sub></sub></b>	Average Warning Time		<b>min</b>	<b>min</b>
<b>W<sub>t<sub>e</sub></sub></b>	Individual Escape Time <i>or</i> Warning Time for Escape	Not used directly.	<b>min</b>	<b>min</b>
<b>W<sub>t<sub>i</sub></sub></b>	Individual Warning Time	Not used directly.	<b>min</b>	<b>min</b>
<b>W<sub>t<sub>pf</sub></sub></b>	Pre-failure $W_t$	Can begin prior to failure (= $W_t$ )	<b>min</b>	<b>min</b>
<b>W<sub>t<sub>pof</sub></sub></b>	Post-failue $W_t$	Does not begin until failure.	<b>min</b>	<b>min</b>
<b>W<sub>w</sub></b>	Wall of Water (Height of)	If "0", means no wall, so use R.	<b>m</b>	<b>ft</b>
<b>W<sub>w<sub>r</sub></sub></b>	Wall of Water with D via R	See chapter V.	<b>ft</b>	<b>ft</b>
<b>Z<sub>d</sub></b>	Zone Density(ies)	Number of people in a zone	<b>p</b>	<b>p</b>

3. Cutoff at a convenient contour between 6 and 12 inches: Between the extremes.

*Life Loss (L)*

Deaths of any kind and at any location that can be attributed directly or indirectly to flooding, without regard to whether or not the deaths would have occurred had the dam not failed under the same initiating hydrologic conditions. When victims remain on the list of missing in the most recent reports, they are included in L.

*Threatened Population (Tpar)*

All those present when the flood wave arrives.

*SubPar (Par<sub>i</sub>)*

Subdivided whenever there is a clear change in a major variable.

*Proportion of Life Loss (P)*

$P = L/Par$  and  $P_i = L_i/Par_i$ .

*Natural Channel [Never a Dam] Life Loss (Ln)*

Expected L given that the dam had never been built. Assumes less flood plain development and different recreational patterns. Ln is counter-historical, except in the case of flash floods on undammed rivers.

*Life Loss Given Dam Removal (Ldr)*

Assumes the dam is removed, sediment issues are resolved, and the channel through the reservoir is restored, using the then-current development and geomorphology.

*No Failure Life Loss (Lnf)*

Had the dam not failed given the same initiating conditions.

*Locations of Deaths*

Where an individual was overcome, in contrast to where found. Associates death with a Par<sub>i</sub>, or more detail when available.

*Fatality Type (Ft)*

Ideally, each symbol accompanied by an associated number of deaths.

N = none.

C = campers, including recreationists hiking/walking/standing near the river.

W = those in the river when the flood wave appears: wade fishermen, swimmers, rescue workers, etc.

B = those on the river when the flood wave appears: boaters and rafters.

L = those in or on a lake when the flood wave appears: boaters and swimmers.

E = employees of the dam who are at the dam for construction, repairs, monitoring, failure prevention, etc.

Af = automobile occupants killed by flood waters.

Aa = those killed in an automobile accident during evacuation.

- D = general drowning deaths in town (trapped in a building or washed away) apart from the previous categories.
- Sf = slope failure at or very near the dam itself.
- O = other = non-drowning deaths other than auto-related or slope failure near the dam: mudslide associated with the flooding and not the dam failure itself, suicide, heart-attack, exposure, etc.
- U = unknown mix.

## **Flood Characteristics**

### *Flood Type (Flt)*

- D = dam failure.
- Dy = failure of a dyke, thus being similar in some respects to a long dam.
- Ff = a flash flood, meaning the flood wave is sudden and fast rising or a wall of water.
- F = flood, meaning a widespread event that can't be described according to the other categories.
- Ts = a tsunami or tidal wave.
- S = a sea surge.
- H = flooding caused by a hurricane and distinguished from F or Ff in that the deaths are not necessarily a result of the flooding.
- Gb = a glacier burst.
- O = other types of flooding difficult to categorize, such as when a storage tank or water tower bursts.

### *Peak velocity at Par<sub>i</sub> (V)*

Approaching flood wave or post-failure flood routing.

### *Maximum depth at Par<sub>i</sub> (D)*

Estimated using high water marks or the height of a wall of water (variable Ww). The datum should be the lowest point at which Par<sub>i</sub> might have originally occupied.

### *Peak Volumetric Flow Rate (Qp)*

### *Bankfull Volumetric Flow Rate (Qb)*

### *Maximum Width of Floodwaters at Par<sub>i</sub> (W)*

$W = W_{\max}$ . Alternatively, one can use  $W_{t_{\min}}$  or  $W_{t_{\text{avg}}}$ .

### *Destructive Velocity (Dv)*

$Dv = (\text{Discharge above bankfull})/(\text{width of flooded region}) = (Q_{\text{peak}} - Q_{\text{bankfull}})/\text{width}$ .

- Not (maximum depth)\*(velocity).
- Should use maximum values, even if at different times.
- Dv can be  $Dv_{\min}$ ,  $Dv_{\max}$ , or  $Dv_{\text{avg}}$  depending on the choice of W.

### *Maximum Rise Rate (R)*

Steepest portion of the rising edge of the outflow hydrograph (cfs/min):

M = moderate (can walk away from the flood waters if no lingering).

- H = high = rapid (requires immediate, rapid action to avoid being trapped).  
 V = very rapid (difficult or impossible to outpace waters, even with immediate evacuation on foot or by automobile).  
 Ww = wall of water (indicates the rise rate is instantaneous and can only be quantified by measuring the height of the wall of water--variable Ww).

*"Wall of Water" [height of] (Ww)*

Most credible estimates should be averaged. Ww = 0 when not a wall.

*Damage and Destruction (Dd)*

The number of structures each destroyed, seriously damaged and damaged to any extent, by category of structure and degree of damage.

*Forcefulness (Fp, Fd, F<sub>5</sub>, Fpar):*

(Fp) = (# residences destroyed or seriously damaged)/(all residences experiencing any damage).

(Fd) = 1 whenever Fp ≥ 0.2. subjective; includes the destruction that would have been likely if residences were physically present.

(F<sub>5</sub>) L = low (0 - 0.2).

M = medium (0.2 - 0.4).

H = high (0.4 - 0.6).

V = very high (0.6 - 0.8).

E = exceptionally high, meaning there was nearly complete destruction (0.8 - 1.0).

(Fpar) = (# habitable structures [not businesses] of any type, damaged severely or destroyed)/(Par<sub>i</sub>).

*Height of the Reservoir Pool at Failure (Hp)*

Given overtopping, the depth of overtopping is added to the height of the dam. In the absence of overtopping, the distance to the reservoir pool below the dam crest is subtracted from the height of the dam.

*Height of the dam (H)*

Ideally, this is measured from the streambed.

*Breadth of the Dam (B)*

This is the crest length, not the thickness. H and B describe the dam prior to failure.

*Volume of Release (Vol)*

Does not include additional inflows into the reservoir after failure.

*Rate of Failure (Rf)*

The "most rapid" 80% of the failure (in minutes).

To help standardize eye-witness accounts:

- nearly instantaneous (i.e., "as an explosion", "quicker than you can write these words", etc.) = 0.5 minutes.
- very rapid erosion or slope failure short of near-instantaneous = 5 min.

- more or less rapidly as evidence supports.

*Area of Final Breach (A)*

### **Spatial and Temporal Relationships Between $Par_i$ and the Flood**

*Summary of month/day/year, hour, and day of the week (T)*

A complete record. T is broken out below.

*Time of Day (Td)*

N = night (most people are asleep; 11:30 PM - 6:00 AM).

S = separation (most families are separated by school or work; 8:00 AM - 6:00 PM on weekdays).

H = home (most families are together; 6:00 - 8:00 AM, 6:00 - 11:30 PM; weekends, holidays, or  $Par_i$  dominated by recreationists during non-night hours).

*Time of the Week (Tw)*

Wend = weekend.

Wday = weekday.

*Time of the Year (Ty)*

Month, coded as 1-12.

*Time of the Season (Ts)*

S = summer (May - October).

W = winter (November - April).

*Warning Time (Wt)*

From when the first official warning to when the leading edge of potentially lethal flood waters first arrive at the leading edge of  $Par_i$ . Official warning is any warning that reaches a member of  $Par_i$ , is intended to be received by others, and encourages evacuation.

*Average Warning Time ( $Wt_{avg}$ )*

Ballpark estimate of the average individual  $Wt_i$ , independent of the "official"  $Wt$ . It includes  $Sc$ , but excludes warnings that the population as a whole tends to discount, such as reports that a dam might fail following a history of false alarms.

*Building Types by Percent (Bt)*

Categories might need to be lumped together:

N = none.

T = tents.

Sh = shacks or flimsy buildings.

M = mobile homes or RVs.

R = residential homes.

C = commercial.

H = commercial over 2 stories.

Lm = structures with less mobile populations (hospitals, nursing homes, schools).

*Development (Dev)*

Degree of urbanization:

N = none (rural, communities under 100)

L = low = small town

M = medium = suburban

H = highly urbanized; large city, densely populated, high rises

*Goodness of fit (Gf)*

Spatial variable that describes the variance in risk--that is, their spatial homogeneity or heterogeneity with respect to the river:

L = low = poor (a large, urban area; multiple communities over a long reach of river; wide flood plain; mix of canyon and open plain; variable values would suggest excessive danger more often than not if applied on the individual level).

M = moderate = satisfactory (a typical small town or mountain community with some residences near the river and some on higher ground or in the hills; a series of small communities with similar warning time; a wide flood plain with urban/suburban development among which the flood rises slowly).

H = high = good (all of Pari reside within a narrow flood path; small canyon community clustered along the river; campgrounds; very small Par in a similar location, such as a few cars at a flooded road).

V = very high = very good (a huge wave which submerges an entire community without warning; a wave which annihilates virtually every structure within the area of Pari; no basis for saying some members of Pari are safer than others and no time to escape before the flood arrives).

*Outdoors (O)*

Tents are considered outdoors.

I = indoors (winter, work hours, night).

O = outdoors (summer, recreationists, campgrounds).

*Sensory Clues (Sc)*

Using testimony, estimate this warning (min.). Sc = 0 when none.

*Preparedness (Pr)*

Preparedness to evacuate at least half an hour before Wt begins. Considers news reports, false alarms, evacuation rehearsals, alerts, experience with flooding, etc.

N = none (not aware of the potential for danger 0.5 hr before Wt begins).

L = low (aware the safety of the dam is in question, but not considered serious).

M = moderate (alert to the potential for evacuation or experienced in evacuation).

H = high (expecting to evacuate and concrete steps toward that eventuality).

*Warning Effectiveness (We)*

How effectively a warning campaign mobilizes a community. It can be gauged historically by evacuation effectiveness: % of  $Par_i$  receiving a warning, rate warning propagates, and effectiveness in mobilization (believability and urgency).

N = no official warning.

L = low (fewer than 50% receiving or believing a timely warning).

M = moderate (up to 90% receiving and believing a timely warning).

H = high (virtually complete evacuation before the flood wave arrives).

If no numbers, guess using testimony. Note even a haphazard warning may propagate effectively given enough time.

*Evacuation subPar ( $Epar_j$ )*

A subgroup of  $Par_i$  characterized by the same  $Ret$ .  $Epar_j$  need not have equal numbers, and the number of groups can be one or more depending on the degree of heterogeneity within  $Par_i$ .

*Representative Evacuation Time ( $Ret$ )*

The number of minutes it will take to evacuate  $Epar_j$ , for use in calculating E. The following table can provide guidance, but case-specific information should govern.

*Ease of Evacuation [Avg. Excess Evacuation Time] ( $E$ )*

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^n Epar_j * (Wt_{avg} - Ret_j)}{Par_i}$$

When E is negative, the average evacuation time needed was greater than the time available.

Table D.3. Reference guide to aid in estimating E and Ret

Width of the Flood (ft)	Outdoor Distance to Safety (ft)	Dev (N, L, M, H)	Sense of Urgency	Mobility (L, H)*	Range of Evacuation Times for a Family (min)		Ret <sub>i</sub> (min)	
					Day	Night	Day	Night
1,000	300	N-M	High	H	0.5-3	1-6	1	2
1,000	300	N-M	High	L	2-10	4-15	4	6
2,500	1,000	N-L	High	H	3-6	4-10	4	7
2,500	1,000	M-H	High	H	3-10	4-15	6	8
2,500	1,000	N-H	High	L	3-10	5-15	6	8
5,500	2,500	M	High	H	5-20	5-30	10	15
5,500	2,500	N-M	High	L	10-30	10-30	15	20
5,500	2,500	M-H	High	L-group home	20-180	30-180	45	60

\*L implies one person with limited mobility living with one or more others with normal (H) mobility. The final row is an exception, where a nursing home or similar facility is in view.

### Natural Circumstances that Attend the Flood

#### Failure Mode (Fm)

I = internal

Ip = piping

Ie = embankment failure: sliding, overturning, foundation failure, or blowout with normal water levels

F = flooding

F = flooding (dam failure not present or not relevant)

Ff = flash flood (no dam failure)

Ff/D = dam failure contributes little volume to a dominant flash flood

Fo = failure due to overtopping or spillway washout

Fe = embankment failure: slumping, sliding, overturning, foundation failure, or blowout during overtopping or reservoir elevations significantly higher than those for which the dam was designed to ordinarily operate.

S = seismic failure

Sp = piping or other gradual development following an earthquake.

Se = a rapid embankment failure during or shortly after an earthquake.

G = gate failure not leading to dam breach.

L = landslide not leading to dam breach.

#### Attendant Circumstances (Ac)

Ac refers to conditions that attend a flood, the presence of which can increase the fatality rate of the event. Examples include an earthquake, extreme weather conditions such as snow or ice, hurricane-force winds, extreme prior flooding, or a downed radio tower.

It should be noted that power failures, darkness when  $T_d = N$ , and rain are common features of many floods, and the latter two are already noted in the variables  $T_d$  and  $M_l$ . As such, they should only be included under  $A_c$  if their impact was exceptional.

Attendant circumstances should first be described, then corporately assigned a subjective rank based on the impact the circumstances had on variables like  $W_t$ ,  $E$ , and  $R$ .

N = none.

L = low impact.

M = moderate impact.

H = heavy impact.

#### *Magnitude of Loading (M)*

Narrative description: peak rainfall, representative rainfall measurements, and durations would be typical.

N = none (i.e., and internal failure).

L = low = small (loading is common; could be expected every few years).

M = moderate (loading is infrequent; once every 5-15 years).

H = high = large (loading is uncommon; could be expected once every 15-50 years).

V = very large (loading is quite rare; could be expected once every 50-100 years).

E = exceptionally large (loading is difficult to imagine; more rare than 1/100 years).

#### *Magnitude of Local Loading (M<sub>l</sub>)*

Narrative; coded the same way as M.

### **Human Circumstances that Attend the Flood**

#### *Dam Type (D<sub>t</sub>)*

N = none.

E = earthen.

R = rock fill.

M = masonry.

C = concrete gravity.

A = concrete gravity arch.

#### *Rescue Resources (R<sub>r</sub>)*

Helicopters, National Guard, paid or volunteer firefighters, police, emergency management and evacuation personnel, reliable communication, earth-moving equipment, boats, etc.

N = none (rescuers are prevented from assisting until the next day; victims are overwhelmed so quickly that no rescue attempts are feasible).

L = low = limited (rescuers are able to help some people, but they are mostly limited to hand tools: ropes, rowboats, floating debris, human chains, etc.).

M = medium = modern (modern communication, transportation, and rescue resources are available locally, at least in moderate supply; generally reflects the state of development present in urban areas of the USA after 1950).

H = high = exceptional (large numbers of military or rescue workers stationed nearby, immediate access to many local helicopters, an abundance of boats in the

community; plenty of floating debris, trees, tall buildings, or hills to sustain victims until they can be rescued; modern wireless communication systems; state-of-the-art early-warning and evacuation system).

#### *Detectability (Det)*

Signs of imminent failure more than 3 hours before failure.

N = no signs of trouble.

L = low (one or more minor changes at the dam, but would not lead the typical dam monitor to anticipate failure).

M = moderate (sufficient changes to consider altering the reservoir operation as a precaution, but would not lead a typical monitor to expect failure within the year).

H = high (evidence demanding immediate attention, as it suggests a dam failure is not unlikely if no action is taken).

V = very high (dam failure appears probable or imminent and can not be readily avoided).

#### *Striking Characteristics and Valuable Quotations (Schvq)*

Brief narrative summarizing those aspects that are unique or are not adequately described by the variables. Eyewitness descriptions of deaths can provide insight.

L = low = poor (existing variables do a poor job of fully capturing the unique attributes of this flood event).

H = high = good (existing variables do a good job of fully capturing the nature of this flood event).

### **Important Variables Brought to Light During Characterization of Events**

#### *Pre-Failure Warning Time (Wtpf) and*

#### *Post-Failure Warning Time (Wtpof)*

Wtpf indicates the full length of Wt when it begins prior to failure. Wtpof does not start counting until failure begins. Hence, if Wt begins an hour before failure and the flood travels for 30 minutes, Wtpf = Wt = 90 min and Wtpof = 30 min.

#### *Wall of Water Weighted by the Rise Rate (Wwr)*

See definition in Chapter V.

#### *Basis of Par (Bpar)*

This variable identifies cases where pre-failure jitters causes some to leave and Par is then based on those who choose not to leave until a subsequent warning mobilizes the entire population.

Pre = pre-evacuation, meaning before any evacuations have begun.

Post = post-evacuation, meaning Par is based on those left behind after the first group leaves and Tpar is based on those who become trapped in the flood.

#### *Par Type (Pt)*

List each separately and tag with its percent of Par<sub>i</sub>.

- C = campers, including recreationists hiking/walking/standing near the river.
- W = those in the river when the flood wave appears: wade fishermen, swimmers, rescue workers, etc.
- B = those on the river when the flood wave appears: boaters and rafters.
- L = those in or on a lake when the flood wave appears: boaters and swimmers.
- E = employees who are at the dam for construction, repairs, monitoring, failure prevention, etc. Note, it may be desirable to reclassify this Pt as D, W, or another overlapping category for purposes of analysis.
- Af = automobile drivers or passengers.
- T = people occupying a train.
- D = those who, prior to evacuation, are in or near buildings. This corresponds to general drowning deaths in town. These people might encounter the flood while indoors, while evacuating on foot, or while evacuating in a vehicle, but generally speaking, they were quantified based on structural damages and the mode or place of death may not be known.
- U = unknown mix. Whenever possible, subPar should be broken down into pure Pt (C, W, B, L, Af, or D) to facilitate characterization and analysis.

*Proportion of the Threatened Population (Ptpar)*

This is similar to P, except that it is the ratio L/Tpar.

*Evacuation Nonsuccess Factor (Ef)*

$Ef = Tpar/Par$ .

Tpar and “flood arrival” are defined in such a way as to ignore trivial flooding that does not greatly hinder free movement (generally 6-12 inches for waders close to the hillside and lesser depths for those evacuating by automobile).

*Safe Havens (Sh), Chance Havens (Ch), and Pseudo-Safe Havens (Psh)*

See *Global Insights from the Case Studies* in Chapter VI.

*Safe Havens (Sh)*

Safe havens may or may not be flooded, but they represent places of shelter in which deaths have historically been extremely rare. When deaths occur, they generally involve young children or persons of limited mobility who can't swim and are trapped in an area without another person of average ability to assist them. Safe havens include the following:

1. An upper story with sufficiently shallow flooding that occupants are not washed out a window and can float on a bed or stand freely: flow does not rise more than one foot above the windowsills in the highest story (about 3 ft).
2. Quiescent flooding that does not trap people without air. Such flooding can come within 1 ft of a flat ceiling or 2 ft of the peak of a sloped ceiling, whether or not the ceiling is elevated.
3. An attic that is accessible from within a house or trailer.
4. An accessible rooftop that does not depend on chance to reach.
5. A stout tree that is easy to climb, taller than the flood, and not toppled.

6. Any island or region that experiences shallow flooding during the flood's peak, such that depths are easy to resist while standing or clinging to convenient anchors such as telephone poles or lampposts (depths of 1-5 ft, depending on the velocity).
7. The hillside beyond the flood if a member of  $T_{par_i}$  can readily drive or wade to it while the flood is still shallow, or if they can reach it directly from the roof or an upper story.

#### *Chance Havens (Ch)*

Chance havens are refuges in the flood, including floating debris and other types of havens, that are reached primarily by chance or whose benefits are highly unreliable. They contribute significantly to the variance in fatality rates across similar events. Chance havens fall into at least five categories:

1. Rafts and floatation aids: severed rooftops, mattresses, propane tanks, logs, etc.
2. The roof of a floating buildings whenever it drifts more than 100 yards.
3. Any immobile structure or refuge that is reached while drifting, including rooftops, upper-story windows, aerated havens, treetops, overhanging branches, debris dams at bridges that allow victims to walk to dry land, and the shore itself. If people must rely heavily on chance to reach a largely inaccessible roof, this would also constitute a chance haven.
4. Aquatic havens: any location from which shore can be easily reached without fighting high velocities, such as a lake or a quiescent backwater.
5. Wading havens: These are rare, falling in the narrow range of depths and velocities that are too high to be considered safe havens and too low to consistently sweep people away. Due to debris, waves, and unpredictable turbulence, such chance havens might not last long.

#### *Pseudo-Safe Havens (Psh)*

Pseudo-safe havens are safe havens on or in buildings that become reclassified once the building begins to drift. They exist only among a subset of buildings with major damage. Note that rooftops are considered chance havens (Ch) rather than pseudo-safe havens when a building drifts more 300 ft.

#### *Aerated Havens (Ah)*

Aerated havens are typically found only when parts of stationary buildings are torn away (the upper end of  $L_s = M$ ). They are those pockets of protection formed by the remaining walls, floor, counters, etc., that provide a place for survival if the occupants are fortunate enough to have been located in that portion of the building.

#### *Compromised Havens (Coh)*

This simply places pseudo-safe havens and aerated havens in a single category.

#### *Loss of Shelter (Ls)*

The goal is to define subPar such that  $L_s = H100\%$ ,  $M100\%$ , or  $L100\%$ .

L = Low loss of shelter = no structural damage or minor structural damage limited to flooding on the first floor.

M = Major loss of shelter = major structural damage.

H = high (complete) loss of shelter = total destruction.

Mh = highly uncertain whether  $L_s = M$  or  $L_s = H$ .

$L_s$  is not equivalent to economic damages.  $L_s = L$  implies relatively safe havens on every floor,  $L_s = M$  implies complete loss of a safe haven on the first floor, and  $L_s = H$  implies complete loss of all safe havens (and aerated pockets of less-safe shelter) including any accessible rooftops. Since loss of a safe haven is generally accompanied by structural damage, traditional categories of minor and major damage generally agree with  $L_s = L$  and  $L_s = M$  when they are based on structural damages and not mere water damage. By contrast,  $L_s = H$  only if no accessible, aerated pockets of protection remain, regardless of whether a building floats off its foundation or is later condemned.

The following refinements, based on historical observations, should be kept in mind (see *Global Insights from the Case Studies* in Chapter VI):

$L_s = L$

- When there is minor structural damage and the flood does not encroach within a foot of the first-floor ceiling or within 2 ft of the peak of a sloped ceiling.

$L_s = M$

- If the flood does not crest an accessible roof.
- If walls are ripped off but portions of walls and floors or counters remain to shelter occupants; but if only trivial structural members remain such that all shelter is lost, the dwelling is destroyed.
- If a building floats off its foundation and maintains an accessible pseudo-safe haven for the duration of the flood.

$L_s = H$

- Any time it is torn apart and submerged in the flood.
- If a rooftop is inaccessible and the top floor or accessible attic is submerged.
- If a roof is accessible, the building is considered destroyed only if the flood or flood waves wash across the crest of the roof to an extent likely to wash people into the flood. Since the momentum of the flood riding the slant of the roof will cause waves to run up, this elevation is generally on the order of a foot or two below the roof's crest.

$L_s = Mh$

- $L_s = Mh$  means that, based on uncertainty, analysts view  $L_s = M$  and  $L_s = H$  as having roughly equal probabilities.

*Weighted Loss of Shelter ( $L_{sw}$ )*

$L_s$  is put on a scale from 0 to 1 (see Chapter V for details).

*Safe Zones ( $S_z$ ), Compromised Zones ( $Co_z$ )*

*Chance Zones ( $C_z$ ), and Pseudo-Chance Zones ( $Pc_z$ )*

- *Safe Zones ( $S_z$ ):* all safe havens and havens that have been only mildly compromised.
- *Compromised Zones ( $Co_z$ ):* that central portion of compromised havens that have not been purposely classified as safe zones or pseudo-chance zones.
- *Chance Zones ( $C_z$ ):* places where people are submerged or face the open flood, and all chance havens that might be reached while drifting.

- *Pseudo-Chance Zones (Pcz)*: buildings in that range of depths\*velocities for which it is unclear whether the building is likely to be destroyed, float far downstream, or experience very major damage.

*Zone Density or Zone Densities (Zd),  
Safe Zone Density (Szd),  
Compromised Zone Density (Cozd)  
Chance Zone Density (Czd), and  
Pseudo-Chance Zone Density (Pczd)*

Density represents the distribution of  $T_{par_i}$  among flood zones based on topographic, structural, and hydraulic considerations as they interface with flood routing and the rise rate of the flood. The word “density” refers to the number of people who have access to a category rather than to the physical dimensions of flood zones themselves. Access includes the physical ability to move to a location and sufficient time to get there before being cut off by the flood. Accessibility is cut off if the flood rises too quickly, but this is rarely a concern when  $L_s = M$ , the usual case for which densities are widely distributed.

Thus, *Szd*, *Cozd*, *Pczd*, and *Czd*, each represent the number of people expected to be in each of the corresponding flood zones. People can be expected to choose Sz, Coz, Pcz, and Cz in that order, as they are available. People should be assigned to the highest level that persists for the duration of the flood, with the understanding that they are only assigned to Cz if the haven they previously reached ceases to exist.

*Life Loss in Zones (Lsz, Lcoz, Lpcz, Lcz)*

These are analogous to  $L_i$ , except that they are specific to the zones sz, coz, pcz, and cz.

*Proportion of Lives Lost in Zones (Prsz, Prcoz, Prpcz, and Prcz)*

These are analogous to  $P_{par_i}$ , except that they are specific to the zones sz, coz, pcz, and cz. Note that “proportion” is designated with Pr instead of the traditional P in order to avoid confusion between the pseudo-chance zone (Pcz) and the proportion of lives lost in the cz (Prcz).

### Template used to characterize events in Appendix B

To assist in characterizing every event in a consistent manner, the data for each characterization was recorded on a template. The template leads with a summary table that lists every variable’s value for that event, along with a brief reminder of the variable’s name or meaning, and the choices from which it can be coded. Next, each variable is given its own section following the pattern of presentation in Chapter V. During characterization, every variable assignment is fully supported with narrative and source citations so that researchers can judge the relative merits of the characterizations, make their own informed adjustments, or refine them as additional information comes to light. When a variable is followed by an asterisk (\*) it means that the narrative supporting the designation is found under the same variable for  $Par_1$  or the global introductory characterization of the event as a whole. Three dashes (---) means that there is not currently enough information to estimate the variable.

Because the variables under the sixth category, “Important Variables Brought to Light During Characterization of Events and Subsequent Analysis,” were not part of the original analyses, they were not included in the event template. Future researchers may wish to update the template to reflect these important additions. In particular, they should add the important variables *Pt*, *Ptpar*, *Ef*, *Ls*, *Szd*, *Czd*, *Pczd*, and *Cozd*.

**NAME OF DAM/FLASH FLOOD/FLOOD**

**Par: location, year = size**

**Par<sub>1</sub>: same as Par      OR      Par<sub>1</sub>: description**

**L<sub>1</sub> = ##, P<sub>1</sub> = 0.#####**

Global Event				Subpopulations			
L	P	Par	Tpar	L <sub>i</sub>	P <sub>i</sub>	Par <sub>i</sub>	Tpar <sub>i</sub>
Life Loss (p)	Proportion of Lives Lost (u)	Population at Risk (p)	Threatened Population (p)	Life Loss at Current SubPar (p)	Proportion at Current SubPar (u)	Current SubPar (p)	Tpar at Current SubPar (p)
---	---	---	---	---	---	---	---

Incremental Life Loss				Flood Characteristics			
Ln	Lnf	Li <sub>n</sub>	Li <sub>nf</sub>	Ft	Fit	V	D
Natural Channel Life L. (p)	No Failure Life Loss (p)	Incremental L Using Ln (p)	Incremental L Using Lnf (p)	Fatality Types (N,C,W,E,Af, Aa,D,Sf,O,U)	Flood Type (D,Dy,Ff,F,Ts, S,H,Gb,O)	Peak Velocity (ft/s)	Maximum Depth (ft)
---	---	---	---	---	---	---	---

Flood Characteristics (Continued)							
Qp	Qb	W	Dv	R	Ww	Fp	Fd
Peak Flow Rate (cfs)	Bankfull Flow Rate (cfs)	Maximum Width (ft)	Destructive Velocity (ft <sup>2</sup> /s)	Max. Rise Rate (M,H,V,Ww) (cfs/min)	Wall of Water (Height) (ft; 0 --> R)	Proportional Forcefulness (0.0 - 1.0)	Dichotomous Forcefulness (0 or 1)
---	---	---	---	---	---	---	---

Flood Characteristics (Continued)							
F <sub>5</sub>	Fpar	H	Hp	B	Vol	Rf	A
Incremental Forcefulness (L,M,H,V,E)	Forcefulness per SubPar (bldg/p)	Height of Dam (ft)	Height of Reservoir (ft)	Breadth of Dam (Crest Length) (ft)	Volume of Release (acre-ft)	Rate of 80% Failure (min)	Area of Final Breach (ft <sup>2</sup> )
---	---	---	---	---	---	---	---

Spatial and Temporal Relationships							
Td	Tw	Ty	Ts	Wt	Wt <sub>avg</sub>	Bt	Dev
Time of Day (Night, Home, Separation)	Time of Week (Wend or Wday)	Time of Year (1 - 12)	Time of Season (Summer or Winter)	Warning Time (min)	Avg. Individual Warning Time (min)	Bldg Types (%) (N,T,Sh,M,R, C,H,Lm)	Development (Urbanization) (N,L,M,H)
---	---	---	---	---	---	---	---

Spatial and Temporal Relationships (Continued)					
Gf	O	Sc	Pr	We	E
Goodness of Fit (L,M,H,V)	Outdoors (Indoors or Outdoors)	Sensory Clues (min)	Preparedness (N,L,M,H)	Warning Effectiveness (N,L,M,H)	Ease of Evacuation (min)
---	---	---	---	---	---

Attendant Circumstances							
Fm	Ac	M	MI	Dt	Rr	Det	Schvq
Failure Mode (Ip,Ie:F,Ff,Ff/D,Fo, Fe;Sp,Se;G,L)	Attendant Circumstances (N,L,M,H)	Magnitude of Loading (N,L,M,H,V,E)	Magnitude of Local Loading (N,L,M,H,V,E)	Dam Type (N,E,R,M,C,A)	Rescue Resources (N,L,M,H)	Detectability (N,L,M,H,V)	Striking . . . (Predictor Fit) (L,H)
---	---	---	---	---	---	---	---

## Introductory Summary

### Global Event

*Par* (Population at Risk) \*

*L* (Life Loss) \*

*Tpar* (Threatened Population) ---

### SubPar

*Par<sub>1</sub>* (Current SubPar) \*

*L<sub>1</sub>* (L Among SubPar) \*

*Tpar<sub>1</sub>* (Tpar Among subPar) ---

### Incremental Losses and Data on Fatalities

*Ln, Ldr, Lnf* (Natural Channel-, Dam Removal-, No Failure Life Loss) ---

*Ft* (Fatality Type) ---

*Identification/Location of Fatalities* ---

### Flood Characteristics

*Flt* (Flood Type) \*

*V* (Peak Velocity) ---

*D* (Maximum Depth) ---

*Qp* (Peak Flow Rate) ---

*Qb* (Bankfull Flow Rate) ---

*W* (Maximum Width) ---

*Dv* (Destructive Velocity) \*

*R* (Maximum Rise Rate) \*

*Ww* (Height of Wall of Water) \*

*Dd* (Damage and Destruction) \*

*Fp* (Proportional Forcefulness) \*

*Fd* (Dichotomous Forcefulness) \*

*F<sub>5</sub>* (Incremental Forcefulness) \*

*Fpar* (Forcefulness per SubPar) \*

*H* (Height of the Dam) \*

*Hp* (Height of Reservoir Pool) \*

*B* (Breadth of Dam) \*

*Vol* (Volume of Release) \*

*Rf* (Rate of Failure) \*

*A* (Area of Final Breach) \*

### Spatial and Temporal Relationships Between Par<sub>i</sub> and the Flood

<i>T</i>	(Time Summary)	*
<i>Td</i>	(Time of Day)	*
<i>Tw</i>	(Time of Week)	*
<i>Ty</i>	(Time of Year)	*
<i>Ts</i>	(Time of Season)	*
<i>Wt</i>	(Warning Time)	*
<i>Wt<sub>avg</sub></i>	(Avg. Individual <i>Wt</i> )	*
<i>Bt</i>	(Building Types, %)	---
<i>Dev</i>	(Development/Urbanization)	*
<i>Gf</i>	(Goodness of Fit)	*
<i>O</i>	(Outdoors)	*
<i>Sc</i>	(Sensory Clues)	*
<i>Pr</i>	(Preparedness)	*
<i>We</i>	(Warning Effectiveness)	*
<i>Epar</i> (Evacuation SubPar) and <i>Ret</i> (Representative Evacuation Time):		
	( <i>Epar</i> <sub>1</sub> )	( <i>Ret</i> <sub>1</sub> )
	( <i>Epar</i> <sub>2</sub> )	( <i>Ret</i> <sub>2</sub> )
	( <i>Epar</i> <sub>3</sub> )	( <i>Ret</i> <sub>3</sub> )
	( <i>Epar</i> <sub>4</sub> )	( <i>Ret</i> <sub>4</sub> )
	( <i>Epar</i> <sub>5</sub> )	( <i>Ret</i> <sub>5</sub> )
<i>E</i>	(Ease of Evacuation)	*

### Natural Circumstances that Attend the Flood

<i>Fm</i>	(Failure Mode)	*
<i>Ac</i>	(Attendant Circumstances)	*
<i>M</i>	(Magnitude of Loading)	*
<i>MI</i>	(Mag. of Loading, Locally)	*

### Human Circumstances that Attend the Flood

<i>Dt</i>	(Dam Type)	*
<i>Rr</i>	(Rescue Resources)	*
<i>Det</i>	(Detectability)	*
<i>Schvq</i>	(Striking Characteristics and Valuable Quotations):	*

## Case Bibliography

\*



## **ANNEXE E**

**Tableaux de valeurs des coefficients a et b de la formule développée par Zhai et al, tirée de [8]**



TABLE 2. Parameters of the Fatality Function for Different Periods.

Period	1947-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-2001	1947-2001
a (95 percent C.I.)	1.037 (0.840-1.235)	1.103 (0.902-1.305)	0.912 (0.739-1.085)	0.778 (0.508-1.047)	0.734 (0.487-0.980)	1.011 (0.923-1.099)
b (95 percent C.I.)	-2.977 (-3.914 - -2.040)	-3.690 (-4.612--2.767)	-2.810 (-3.565--2.054)	-2.231 (-3.353--1.110)	-2.140 (-3.086 - -1.194)	-3.148 (-3.533 - -2.764)
Adj. R <sup>2</sup>	0.689	0.653	0.733	0.504	0.437	0.685
T	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
N (Sample No.)	51	64	42	34	46	237

TABLE 3. Parameters of the Injury Function for Different Periods.

Period	1947-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-2001	1947-2001
a (95 percent C.I.)	1.293 (1.073-1.514)	1.141 (0.888-1.395)	0.828 (0.667-0.989)	0.707 (0.460-0.954)	0.644 (0.367-0.920)	0.894 (0.802-0.986)
b (95 percent C.I.)	-3.823 (-4.871 - -2.445)	-3.355 (-4.509--2.202)	-1.957 (-2.632--1.282)	-1.419 (-2.395--0.443)	-1.120 (-2.126 - -0.114)	-2.117 (-2.509 - -1.726)
Adj. R <sup>2</sup>	0.734	0.555	0.693	0.448	0.270	0.583
T	100	100	100	100	100	100
N (Sample No.)	51	65	48	41	57	262

TABLE 4. Parameters of the Fatality Function for Rainy Season Floods.

Period	1947-1979	1980-2001	1947-2001
a (95 percent C.I.)	1.024 (0.849-1.199)	0.986 (0.680-1.293)	1.043 (0.904-1.182)
b (95 percent C.I.)	-3.214 (-3.979 - -2.450)	-3.168 (-4.362- -1.973)	-3.324 (-3.914 - -2.735)
Adj. R <sup>2</sup>	0.647	0.576	0.675
T	1,000	1,000	1,000
N (Sample No.)	75	32	107

TABLE 5. Parameters of the Injury Function for Rainy Season Floods.

Period	1947-1979	1980-2001	1947-2001
a (95 percent C.I.)	1.061 (0.871-1.252)	0.738 (0.482-0.994)	0.992 (0.853-1.131)
b (95 percent C.I.)	-2.969 (-3.797 - -2.142)	-1.856 (-2.805 - -0.907)	-2.709 (-3.285 - -2.133)
Adj. R <sup>2</sup>	0.616	0.465	0.633
T	100	100	100
N (Sample No.)	77	39	116

TABLE 6. Parameters of the Fatality Function for Flash Floods.

Period	1947-1979	1980-2001	1947-2001
a (95 percent C.I.)	1.099 (0.927-1.272)	0.661 (0.455-0.867)	0.974 (0.856-1.092)
b (95 percent C.I.)	-3.512 (-4.333 - -2.692)	-1.753 (-2.582 - -0.925)	-2.952 (-3.483- -2.422)
Adj. R <sup>2</sup>	0.663	0.465	0.673
T	1,000	1,000	1,000
N (Sample No.)	82	47	129

TABLE 7. Parameters of the Injury Function for Flash Floods.

Period	1947-1979	1980-2001	1947-2001
a (95 percent C.I.)	1.040 (0.879-1.201)	0.595 (0.383-0.807)	0.809 (0.693-0.926)
b (95 percent C.I.)	-2.720 (-3.470- -1.971)	-0.717 (-1.526- 0.092)	-1.604 (-2.108- -1.099)
Adj. R <sup>2</sup>	0.656	0.345	0.565
T	100	100	100
N (Sample No.)	87	59	146

## **ANNEXE F**

**Table donnant le nombre moyen de personnes dans chaque type de bâtiment, tirée de [23]**



# 7 Appendices

## 7.1 Appendix A - Default Populations

Nature of Buildings or Other Places of Occupation	Equivalent Population
Detached housing <sup>1</sup>	2.9 per house
Semi-detached, row or terrace housing <sup>1</sup>	2.0 per house
Multi-unit buildings <sup>1</sup>	1.7 per unit
Blocks of flats <sup>1</sup>	1.7 per flat
House or flat attached to a shop, office, etc. <sup>1</sup>	2.5 per house or flat
Approved caravan parks <sup>1,16</sup>	1.8 per caravan site
Approved camping grounds <sup>2,16</sup>	0.45 per camping site
Hotel/motel accommodation <sup>3</sup>	1.0 per bedroom
Child-care centres <sup>4</sup>	0.4 per child and staff member
Kindergartens; Pre-schools <sup>5</sup>	0.25 per student and staff member
Primary schools (day) <sup>5</sup>	0.25 per student and staff member
High schools (day) <sup>6</sup>	0.3 per student and staff member
Tertiary education centres <sup>7</sup>	
lectures - day	0.35 per student and staff member attending during the day
lectures - evening	0.15 per student and staff member attending during the night
Offices <sup>8</sup>	0.4 per employee
Restaurants <sup>9</sup>	0.3 per member of staff and diner's places
Medical centres <sup>10</sup>	1.7 per member of staff
Tavern/hotel bars <sup>11</sup>	0.15 per m <sup>2</sup> of patrons' area
Shops; Shopping centres <sup>12</sup>	2.0 per 100 m <sup>2</sup> of gross area
Hospitals <sup>13</sup>	1.0 per bed plus 0.33 times the total number of staff
Institutional accommodation <sup>14</sup>	1.0 per bed plus 0.33 times the total number of staff
Service stations <sup>15</sup>	0.4 times the total number of staff
Industrial buildings and other non-residential sites	0.4 times the total number of staff
Department of Transport Moorings	2.0 per mooring

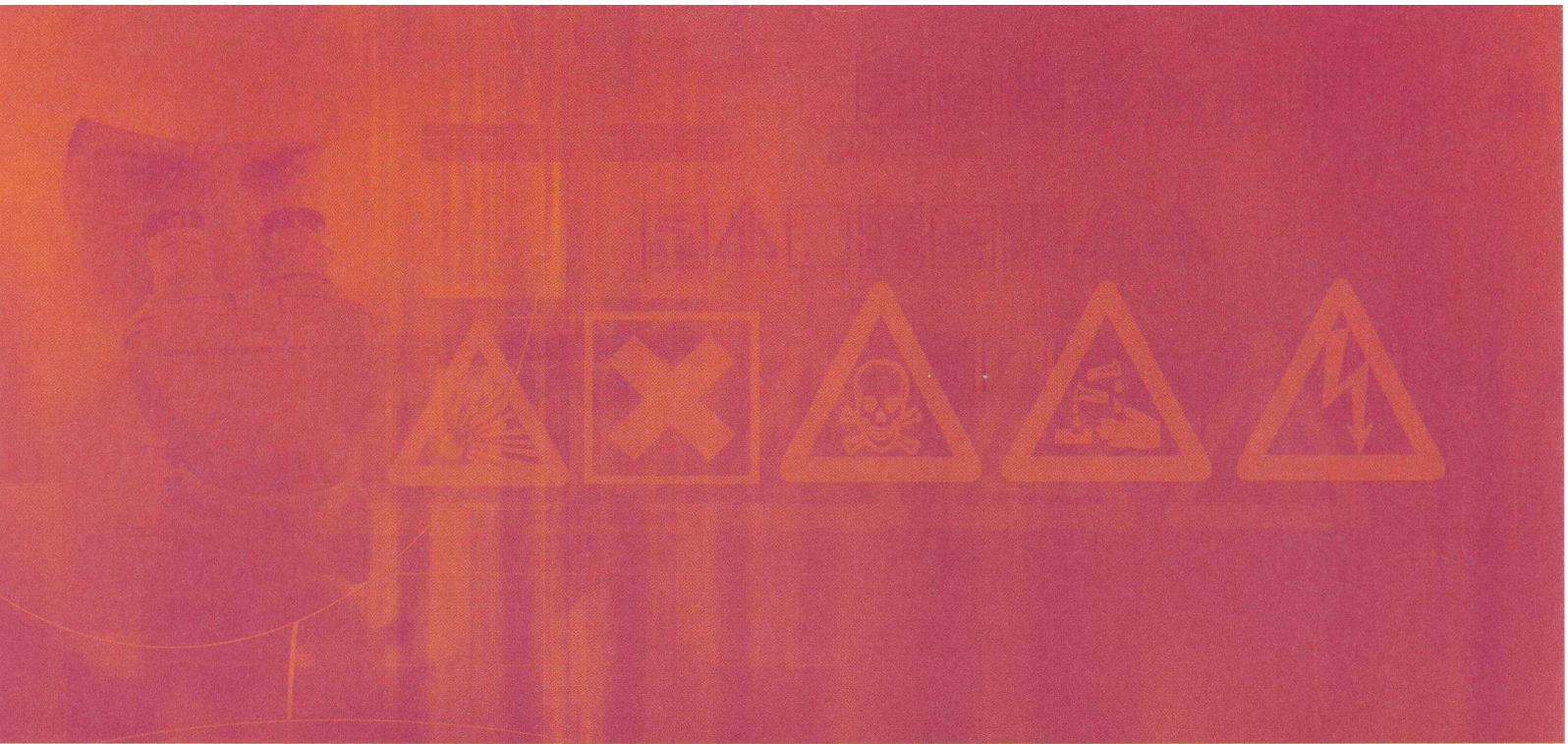
**Notes:**

1. The occupancies for these dwellings are derived from the overall Queensland figures for “persons, by dwelling structure” and occupied “dwelling structures, by tenure type (private dwellings)” in the 1996 census.
2. This occupancy comes from an analysis of 1999 figures for the number of permits issued, the numbers of campers per permit and the duration of each permit for 20 camping grounds under the control of the Department. The average number of campers per permit was 3.0 and the average site occupancy rate was 14.5%. Therefore an average occupancy value of 0.45 campers per site has been adopted.
3. This occupancy assumes that a hotel/motel bedroom will typically accommodate 2 people, who will be present for half of any one day, and that number of staff will compensate for the fact that generally not all rooms will be (fully) occupied.
4. This occupancy is based on a typical 9.5 hour day (8:00-5:30).
5. These occupancies are based on a typical 6 hour day (9:00-3:00).
6. This occupancy is based on a typical 7 hour day (8:30-3:30).
7. These occupancies are based on a typical 8 hour day (9:00-5:00) for day lectures and a typical 3 hour day (6:00-9:00) for evening lectures.
8. This occupancy is based on a typical 9 hour day (8:30-5:30).
9. This occupancy is based on the following assumed patronage:
  - a. 10% full-9:00 am - noon, 2:00 pm - 6:30 pm
  - b. full-noon - 2:00 pm, 6:30 pm - 10:30 pm
  - c. staff numbers are 10% of number of places.
10. This occupancy is based on a 10 hour day (8:00-6:00) and assumes 3 patients at the location for each doctor and other staff member.
11. This occupancy is based on the following assumed breakdown of daily patronage:
  - a. 10% of daily peak-10:00 am - noon
  - b. daily peak-noon - 2:00 pm
  - c. 15% of daily peak-2:00 pm - 5:00 pm
  - d. daily peak-5:00 pm - 7:00 pm
  - e. 50% of daily peak-7:00 pm - 8:00 pm
  - f. 25% of daily peak-8:00 pm - 10:00 pm.

The Liquor Licensing Division of the Department of Tourism and Racing cited maximum numbers of patrons as 2/m<sup>2</sup> standing and 1/m<sup>2</sup> dining. The occupancy rate is therefore based on an assumed annual average for the daily peak patronage of 0.6/m<sup>2</sup> plus a 10% allowance to cover staff.

12. This occupancy rate is an estimate based on Appendix B of Volume 1 of the Department of Natural Resource Guidelines for Planning and Design of Sewerage Schemes.
13. The occupancy rate of 1.0 per bed assumes that the number of visitors will compensate for the fact that generally not all beds will be occupied. The staff factor applies to the sum of the numbers of staff on different shifts.
14. These occupancies are identical to those for hospitals. It has been assumed that lower visitor numbers will offset the higher “bed” occupancy ratio for institutions.
15. This occupancy rate applies to the sum of the numbers of staff on different shifts. It contains a 20% allowance to cover customers.
16. Only camping areas and caravan parks approved by government agencies (local, state or federal) or included in local authority planning schemes should be included. Because of the difficulties associated with determining the number of sites, and their permanence, of non-approved camping grounds and caravan parks, they are excluded from assessment.





**INERIS**

*maîtriser le risque  
pour un développement durable*

**Institut national de l'environnement industriel et des risques**

Parc Technologique Alata  
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

**E-mail** : [ineris@ineris.fr](mailto:ineris@ineris.fr) - **Internet** : <http://www.ineris.fr>