

RAPPORT D'ÉTUDE  
DRA-13-133737-09398B

18/12/2015

**Programme DRA 91 – Maîtrise des risques dans  
les ouvrages hydrauliques**

**Opération D.3 – Méthode de cotation de la  
gravité adaptée aux études de dangers des  
systèmes d'endiguement**

***Version 2015***



# **Programme DRA 91 – Maîtrise des risques dans les ouvrages hydrauliques**

## **Opération D.3 – Méthode de cotation de la gravité adaptée aux études de dangers des systèmes d'endiguement**

***Version 2015***

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Sandrine DESCOURRIERE, Christophe DUVAL, Anabel LAHOZ, Fiona THEOLEYRE, Adrien WILLOT

## 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.

	Rédaction	Relecture	Vérification		Approbation
NOM	Christophe DUVAL	Thibault BALOUIN	Christophe BOLVIN	Frédéric MERLIER	Sylvain CHAUMETTE
Qualité	Ingénieur à l'Unité IARA  Direction des Risques Accidentels	Responsable du programme DRA91  Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité IARA  Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui à l'administration  Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle AGIR  Direction des Risques Accidentels
Visa					

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. AVANT PROPOS .....</b>	<b>5</b>
1.1 Contexte .....	5
1.2 Objectif et cadre d'utilisation de la méthode .....	5
1.3 Elaboration de la méthode.....	6
1.4 Structure du document .....	6
<b>2. METHODE PROPOSEE .....</b>	<b>7</b>
2.1 Etape 1 : Estimation du nombre de personnes exposées à un phénomène d'inondation intense.....	8
2.2 Etape 2 : Estimation du nombre de personnes en situation de grand danger9	
2.3 Etape 3 : Détermination du niveau de gravité.....	11
<b>3. JUSTIFICATION DE LA METHODE.....</b>	<b>13</b>
3.1 Construction de l'architecture globale de la méthode .....	13
3.2 Calage de l'échelle de caractérisation des niveaux de gravité .....	15
3.3 Calibrage des critères quantitatifs utilisés dans la méthode .....	16
<b>4. LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>21</b>





# 1. AVANT PROPOS

## 1.1 CONTEXTE

Dans le cadre de la réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques, l'article R.214-115 du code de l'environnement<sup>1</sup> indique qu'une étude de dangers est demandée pour les systèmes d'endiguement au sens de l'article R.562-13 du code de l'environnement, quelle que soit leur classe. L'article L.211-3 du code de l'environnement précise que l'étude de dangers « expose les risques que présente l'ouvrage pour la sécurité publique, directement ou indirectement en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'ouvrage. Cette étude prend en compte la probabilité d'occurrence, la cinétique et la **gravité** des accidents potentiels selon une méthodologie qu'elle explicite. Elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets de ces accidents. »

La cotation de la gravité n'est pas encadrée par un arrêté ministériel et le rédacteur de l'étude de dangers est libre d'utiliser la méthode qu'il souhaite. Le guide de lecture relatif aux études de dangers des digues fluviales<sup>2</sup> donne, à titre indicatif, un exemple d'échelle de gravité où les niveaux de gravité sont caractérisés à partir de l'estimation de personnes mises en danger et du caractère amont/aval de l'inondation. Les critères permettant de déterminer les personnes mises en danger ne sont pas définis précisément dans le document.

L'analyse des premières études de dangers fournies à l'administration a montré que l'échelle proposée dans le guide de lecture n'est pas utilisée telle quelle et qu'en l'absence d'une méthode de référence cadrée et adaptée aux systèmes d'endiguement, certains rédacteurs sont enclins à reprendre la caractérisation de la gravité utilisée dans un autre domaine technique et notamment celui des barrages. De plus, l'hétérogénéité des pratiques de cotation de la gravité rend difficile la comparaison des scénarios d'accidents entre différentes études de dangers et altère donc la vision d'ensemble qui devrait se dégager sur le parc de systèmes d'endiguement au niveau national.

## 1.2 OBJECTIF ET CADRE D'UTILISATION DE LA METHODE

De manière synthétique, la méthode fournit un indicateur de gravité qui reflète, a priori, le bilan humain d'un scénario d'inondation accidentelle initié par la défaillance du système d'endiguement. Elle s'appuie à cet effet sur une estimation du nombre de personnes impactées dans les zones potentiellement inondées. Les conséquences sur les biens et sur l'environnement ne sont pas prises en considération.

Cette méthode s'inscrit spécifiquement dans le contexte d'une étude de dangers. Elle a donc été élaborée dans le cadre d'une maîtrise des risques à la source intégrant

---

<sup>1</sup> Article créé par le décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 et modifié par le décret 2015-526 du 12 mai 2015

<sup>2</sup> Circulaire du 16 avril 2010 relative aux études de dangers des digues de protection contre les inondations fluviales

une pondération par les enjeux potentiellement atteints. En ce sens, le résultat obtenu en termes de gravité n'est qu'un indicateur. L'intérêt de définir une méthode cadrée n'est donc pas d'obtenir une estimation précise de la gravité mais davantage de faire partager une même méthode par tous les acteurs de la démarche des études de dangers de systèmes d'endiguement.

Pour autant, les principes retenus dans cette méthode peuvent être utiles dans d'autres contextes que celui de la maîtrise du risque à la source et notamment pour la gestion de crise et la maîtrise de l'urbanisation. Néanmoins, il est clair que la précision nécessaire pour l'évaluation d'un indicateur de gravité destiné à hiérarchiser des mesures de maîtrise des risques est faible en comparaison de la précision nécessaire pour la gestion de crise ou la maîtrise de l'urbanisation. Ainsi, si les principes généraux sur lesquels repose la méthode peuvent être transférés à la gestion de crise ou l'aménagement du territoire, il n'en est pas de même pour les modes d'estimation décrits, qui ont pour vocation de faire ressortir des ordres de grandeur uniquement.

### **1.3 ELABORATION DE LA METHODE**

Dans un premier temps, une version A de la méthode<sup>3</sup> a été établie sur la base de principes généraux issus de méthodes visant le même objectif dans d'autres cadres réglementaires, tout en intégrant les problématiques inhérentes aux inondations que sont la mise à l'abri individuelle des personnes, la tenue structurelle des abris, la présence d'enjeux particulièrement vulnérables et l'évacuation préventive par les services de secours.

Dans un second temps, cette version A a été appliquée sur plusieurs scénarios issus des premières études de dangers fournies à l'administration afin de bénéficier d'une phase de test utile au calibrage de certains paramètres<sup>4</sup>. La version B de la méthode présentée dans ce rapport intègre les évolutions induites par les conclusions de cette phase de test.

L'intérêt principal d'une méthode cadrée étant d'être partagée par le plus grand nombre d'acteurs possibles, il serait nécessaire de recueillir par la suite les avis de différents acteurs des EDD de systèmes d'endiguement sur cette méthode.

### **1.4 STRUCTURE DU DOCUMENT**

Outre cet avant-propos, le présent document s'articule en deux chapitres :

- dans le premier chapitre, la méthode proposée est présentée de manière pratique, à l'attention des rédacteurs d'études de dangers de systèmes d'endiguement qui souhaitent l'appliquer ;
- dans le second chapitre, les hypothèses sur lesquelles repose la construction de la méthode sont présentées, ainsi que la justification et les arguments apportés par rapport aux différents critères et autres éléments chiffrés qui apparaissent dans la méthode.

---

<sup>3</sup> Rapport INERIS-DRA-13-133737-09398A du 13 décembre 2013

<sup>4</sup> Rapport INERIS-DRA-15-141923-01912A du 31 mars 2015



## 2. METHODE PROPOSEE

La méthode proposée est structurée en trois étapes représentées sur le logigramme de la Figure 1. Plus particulièrement, la cotation de la gravité repose sur deux estimations complémentaires qui portent :

- d'une part, sur la population globale exposée au sein de la zone inondée à un phénomène intense ; cette démarche et les critères associés sont classiquement utilisés dans le cadre des études d'aléa inondation ;
- d'autre part, sur la population associée aux configurations jugées très dangereuses en cas d'inondation accidentelle ; cette démarche permet de prendre en compte une population particulièrement vulnérable, susceptible d'accroître fortement le bilan humain.

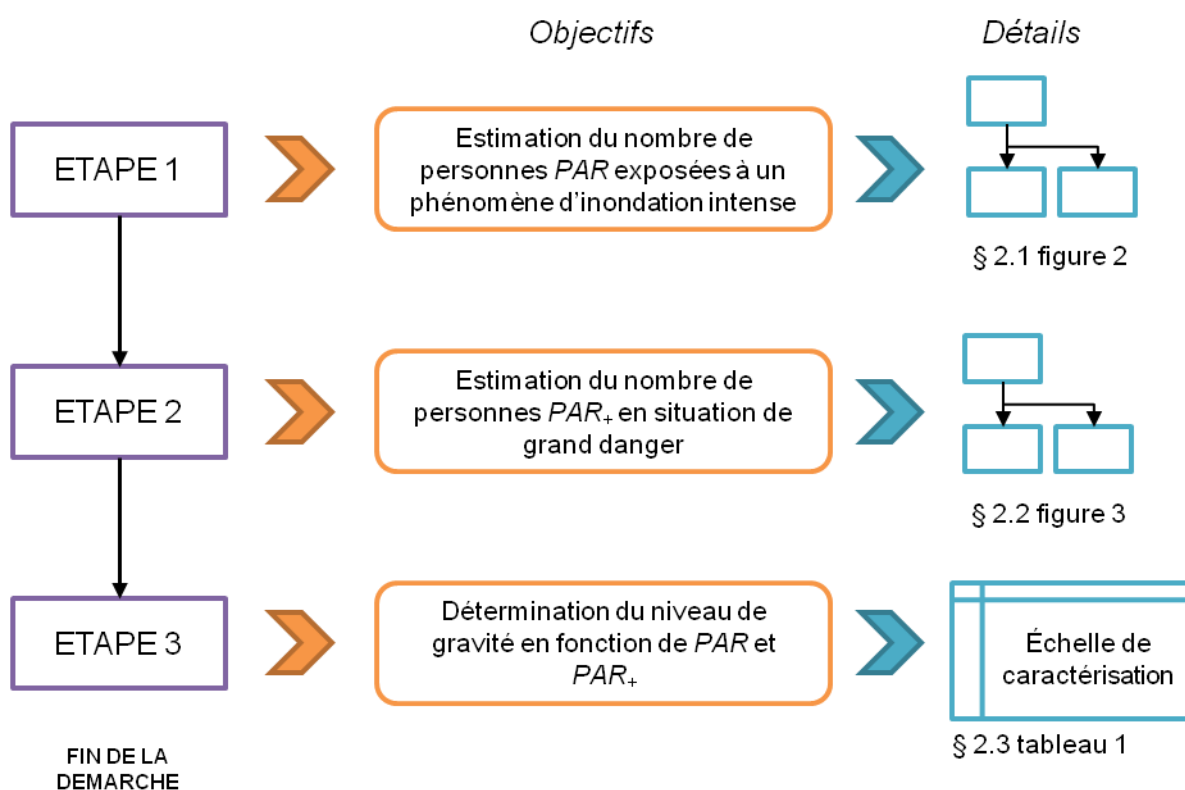


Figure 1 : Démarche générale de cotation de la gravité

Les données d'entrée pour l'estimation du nombre de personnes exposées sont les paramètres physiques caractérisant l'onde de submersion ainsi que des données sur l'occupation du territoire. Il est ainsi nécessaire de disposer a minima d'une représentation cartographique des enjeux de la zone protégée de type BD ORTHO<sup>®</sup> ou SCAN 25<sup>®</sup>. Le recours à une enquête de terrain peut être envisagé lorsque les estimations conservatives réalisées à partir des données globales donnent des résultats très différents de ceux escomptés par une analyse précise.

Les différentes étapes de la méthode sont détaillées dans les paragraphes suivants.

## 2.1 ETAPE 1 : ESTIMATION DU NOMBRE DE PERSONNES EXPOSEES A UN PHENOMENE D'INONDATION INTENSE

Les différentes phases de la démarche d'estimation du nombre de personnes exposées à un phénomène d'inondation intense sont explicitées sur le logigramme de la Figure 2. Les remarques du Tableau 1 complètent le logigramme.

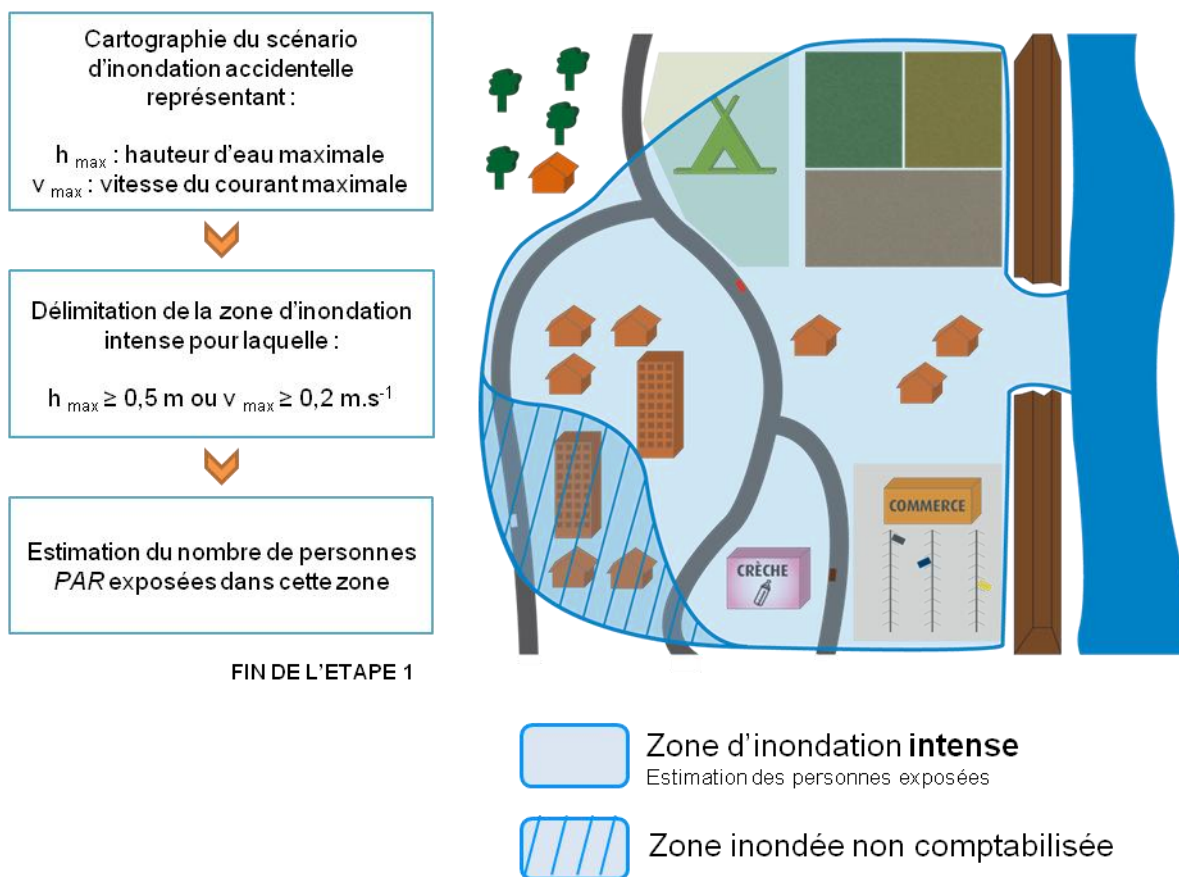


Figure 2 : Démarche d'estimation du nombre de personnes exposées à un phénomène d'inondation intense (PAR)

Remarques	
<b>Estimation du nombre de personnes</b>	L'estimation du nombre de personnes peut être réalisée à partir du type d'occupation des sols, notamment en utilisant les règles de comptage forfaitaire utilisées pour les EDD des installations classées <sup>5</sup> .
<b>Critère de vitesse</b>	Dans un grand nombre de cas, il est probable que la zone délimitée uniquement du fait du critère de vitesse représente une superficie négligeable par rapport à celle de la zone prise dans sa globalité. Dans un premier temps, le recensement peut donc être réalisé sur la base du critère de hauteur uniquement, quitte à être raffiné par la suite si le nombre PAR estimé s'avère proche d'un des seuils de gravité du Tableau 1.

Tableau 1 : Remarques relatives à l'étape 1

<sup>5</sup> Ces règles sont disponibles au paragraphe 1.1.1 de la circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

## 2.2 ETAPE 2 : ESTIMATION DU NOMBRE DE PERSONNES EN SITUATION DE GRAND DANGER

Les différentes phases de la démarche d'estimation du nombre de personnes en situation de grand danger sont explicitées sur le logigramme de la Figure 3. Les remarques du Tableau 2 complètent le logigramme.

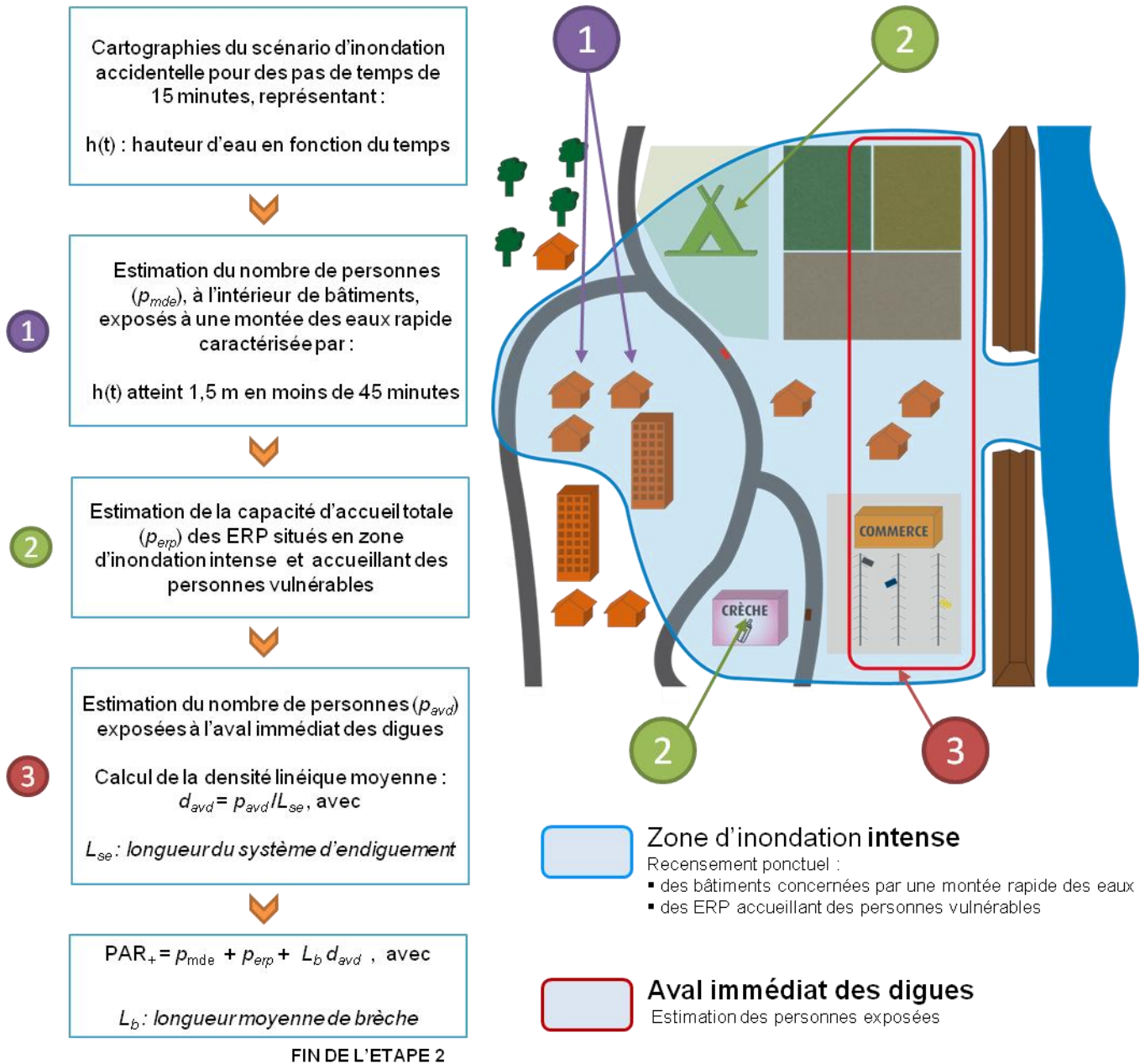


Figure 3 : Démarche d'estimation du nombre de personnes en situation de grand danger ( $PAR_+$ )

Phase	Remarques
1	Dans le cas où des données précises sont disponibles concernant les bâtiments recensés, il peut être envisagé un traitement particulier pour ceux disposant d'un niveau refuge ou d'une zone refuge.
2	Les ERP accueillant des personnes vulnérables sont notamment : les crèches, haltes-garderies, écoles, collèges, lycées, hôpitaux, foyers de personnes en difficulté, maisons de retraite et Mapad ainsi que les campings, métro, parkings et autres espaces souterrains.
1 & 2	<p>Pour certains scénarios d'inondation résultant d'un évènement naturel supérieur à l'objectif de protection du système d'endiguement, une procédure d'évacuation peut exister et cibler explicitement certains bâtiments recensés lors des phases 1 et 2.</p> <p>Dans ce cas, et pour ces scénarios seulement, il peut être envisageable de réviser à la baisse le nombre PAR<sub>+</sub> en justifiant par ailleurs la fiabilité de la procédure d'évacuation considérée. Un retour d'expérience positif sur des exercices d'évacuation semble également nécessaire.</p>
3	<p>Le comptage des personnes situées à l'aval immédiat des digues nécessite de définir une zone où les caractéristiques de l'écoulement sont très dangereuses.</p> <p>Différents documents réglementaires<sup>6</sup> proposent ainsi de définir une bande d'inconstructibilité derrière l'ouvrage grâce à des distances à la digue forfaitaires de type 100xH m, H étant la hauteur de la digue.</p> <p>Dans le cas où une autre définition de la largeur de cette bande est envisagée, l'annexe A apporte des éléments techniques sur la tenue des bâtiments dans un écoulement qui peuvent contribuer à la réflexion.</p>
3	<p>L'estimation du nombre de personnes dans cette bande peut être réalisée à partir du type d'occupation des sols, notamment en utilisant les règles de comptage forfaitaires utilisées pour les EDD des installations classées.</p> <p>Par ailleurs, cette estimation peut se faire en retranchant le nombre de personnes déjà comptées par ailleurs dans les phases 1 et 2.</p>
3	Dans le cas où la densité à l'aval immédiat des digues présente des pics de variation, il peut être envisagé de retenir une densité linéique supérieure à la densité linéique moyenne, en se focalisant sur les segments de digue derrière lesquels l'occupation est la plus importante.

Tableau 2 : Remarques relatives à l'étape 2

<sup>6</sup> Document 1 : *Circulaire du 27/07/11 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux.*

Document 2 : *SDAGE du bassin Loire-Bretagne 2010-2015.*

### 2.3 ETAPE 3 : DETERMINATION DU NIVEAU DE GRAVITE

L'échelle proposée pour caractériser les niveaux de gravité dans les EDD de systèmes d'endiguement est donnée dans le Tableau 3. Le niveau de gravité à retenir est le niveau maximum obtenu sur les deux colonnes.

Niveau de gravité	Nombre de personnes <i>PAR</i> exposées à une intensité moyenne à forte	Nombre de personnes <i>PAR</i> <sub>+</sub> en situation de grand danger
5	> 30 000	> 300
4	] 3 000 ; 30 000 ]	] 100 ; 300 ]
3	] 300 ; 3 000 ]	] 30 ; 100 ]
2	] 30 ; 300 ]	≤ 30
1	≤ 30	-

Tableau 3 : Echelle de caractérisation des niveaux de gravité



### **3. JUSTIFICATION DE LA METHODE**

L'architecture globale de la méthode de cotation de la gravité proposée dans le présent rapport repose sur une série de choix argumentés présentés dans le premier paragraphe de ce chapitre. Ces choix méthodologiques concernent la manière d'intégrer l'intensité et la cinétique du phénomène d'inondation provoqué par la rupture d'un tronçon ainsi que la prise en compte de l'évacuation préventive et de la protection apportée par les bâtiments. Le deuxième paragraphe apporte des éléments sur le calage de l'échelle de caractérisation des niveaux de gravité. La justification des différents critères et autres éléments chiffrés utilisés dans les différentes étapes de la méthode proposée est ensuite exposée dans le troisième paragraphe. Le quatrième paragraphe explique la spécificité de prise en compte des personnes exposées à l'aval immédiat de la digue.

#### **3.1 CONSTRUCTION DE L'ARCHITECTURE GLOBALE DE LA METHODE**

Le retour d'expérience rapporté par différents auteurs concernant des inondations catastrophiques<sup>7,8,9</sup> conforte l'idée commune que les victimes sont en grande majorité et, en dernier ressort, liées à l'aptitude physique des personnes à s'extraire de zones inondées dangereuses, qu'elles soient à pied ou à bord d'un véhicule. En d'autres termes, les causes indirectes, telles que des attaques cardiaques après évacuation ou autres accidents lors du retour dans les lieux inondés, sont minoritaires dans le bilan humain global. Il paraît donc tout à fait cohérent de lier principalement la gravité d'un scénario de rupture d'un système d'endiguement à la population présente dans les zones où le phénomène d'inondation considéré est trop intense pour les capacités physiques d'un être humain.

Bien heureusement, le bilan humain d'une inondation n'est en réalité constitué que d'une fraction des personnes exposées dans ces zones. En effet, les phénomènes d'inondation étant plus ou moins prévisibles et progressifs, la grande majorité des personnes exposées tente avec succès d'évacuer ou de se mettre à l'abri par ses propres moyens, lorsqu'elle n'est pas évacuée de manière préventive. Certaines personnes exposées sont également secourues une fois les habitations inondées. Des auteurs néerlandais ont déterminé la fraction moyenne entre le nombre de personnes impactées et le nombre de victimes dans plusieurs cas réels d'inondations catastrophiques. Ces résultats, présentés par type d'inondation à la Figure 4, ne nous intéressent ici que pour illustrer la grande variabilité qui les affecte et qui atteint souvent deux à trois ordres de grandeur.

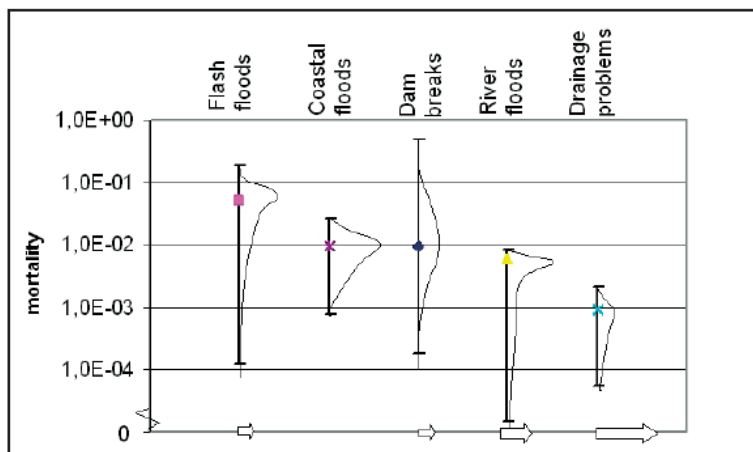
---

<sup>7</sup> Jonkman S.N. Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and applications. PhD Thesis. 2007.

<sup>8</sup> Vinet F., Boissier L., Defossez S. La mortalité comme expression de la vulnérabilité humaine face aux catastrophes naturelles : deux inondations récentes en France (Xynthia, var, 2010). Vertigo, volume 11 n°2. 2001

<sup>9</sup> Belin P., Moulin C., Analyse des situations de danger dans le cadre du retour d'expérience des inondations des 15 et 16 juin 2010 dans le Var. La Houille Blanche n°1 2013.





Traduction des termes en anglais

Mortality : mortalité (rapport entre le nombre de victimes et le nombre de personnes exposées)

Flash floods : crues rapides

Costal floods : submersions marines

Dam breaks : ruptures de barrage

River floods : crues lentes, crues de plaine

Drainage problems : ruissellement urbain

Figure 4 : Rapport moyen constaté (et son intervalle de confiance à 80%) entre le nombre de victimes et le nombre de personnes exposées, par type d'inondation, repris et complété par Jonkman<sup>7</sup> (La flèche représentée sur la ligne inférieure (0) donne de manière schématique la fraction d'inondations sans victimes)

La méthode de cotation proposée est basée sur l'hypothèse que ces variations d'ordre de grandeur sont relatives à des configurations défavorables particulières au sein de la zone inondée.

Le niveau bas de la fourchette de valeurs correspondrait ainsi à un niveau de gravité minimum envisagé suite à la rupture ou au dysfonctionnement du système d'endiguement, en considérant une évacuation préventive efficace, une réponse individuelle globalement adéquate au sein de la population, une bonne tenue structurelle des bâtiments et de bonnes conditions de sauvetage. Même dans de telles conditions, le retour d'expérience montre que le bilan humain n'est pas toujours nul, notamment à cause des comportements à risque lors de telles catastrophes<sup>10</sup>. Le nombre de personnes exposées à une inondation intense a donc pour objectif de refléter le niveau de gravité en l'absence de configurations particulièrement défavorables, étant entendu que seule une faible fraction de cette population est susceptible de contribuer au bilan humain.

Le niveau haut de la fourchette de valeurs correspondrait à un niveau de gravité maximum envisagé dans des conditions particulièrement défavorables, soit :

- une montée des eaux très rapide jusqu'à un niveau important pour laquelle les tentatives individuelles de mise à l'abri ou d'évacuation peuvent être entravées dans certains bâtiments ne disposant pas de zone refuge ;
- des populations particulièrement vulnérables, que la vulnérabilité soit intrinsèque à la population (crèches, haltes-garderies, écoles, collèges, lycées, hôpitaux, foyers de personnes en difficulté, maisons de retraite et Mapad<sup>11</sup>) ou relative à une configuration problématique (campings, métro, parkings et autres espaces souterrains) ;

<sup>10</sup> En revanche, dans les zones inondées où l'inondation n'est pas intense, nous avons considéré que les conséquences sur l'homme sont négligeables par rapport à celles en zone d'inondation intense, ce qui explique qu'elles n'apparaissent pas dans la méthode de cotation de la gravité.

<sup>11</sup> liste inspirée du guide méthodologique : MEDDE. CGEDD. Analyse Multicritères : application aux mesures de prévention des inondations.

- une intensité très forte menaçant indubitablement la vie de personnes en extérieur, voire une intensité extrême susceptible de détruire les bâtiments, mettant en péril les personnes qui se sont mises à l'abri à l'intérieur.

Le nombre de personnes en situation de grand danger peut donc conduire à revoir l'estimation du bilan humain sur un évènement donné, ce qui rend légitime une échelle de caractérisation de la gravité spécifique à ces configurations particulièrement défavorables.

Enfin, l'évacuation préventive est considérée dans cette méthode comme pouvant limiter le bilan humain dans le sens où certaines des configurations défavorables précitées peuvent être neutralisées par une prise en charge adaptée et ciblée en amont de l'inondation de la zone protégée. Cette prise en charge prioritaire doit être prévue dans une procédure d'évacuation dont l'existence est nécessaire pour pouvoir envisager d'activer cette option dans la démarche de cotation de la gravité. Cette procédure ne doit pas être perçue comme un plan d'urgence en tant que tel mais bien comme le maillon essentiel complémentaire au rôle de protection joué par le système d'endiguement. Il ne peut donc s'agir que d'une procédure d'évacuation déclenchée par le dépassement de l'objectif de protection assuré par l'ouvrage.

## 3.2 CALAGE DE L'ECHELLE DE CARACTERISATION DES NIVEAUX DE GRAVITE

### 3.2.1 CALAGE PAR RAPPORT AU NOMBRE DE PERSONNES EXPOSEES A UN PHENOMENE D'INONDATION INTENSE

L'échelle proposée pour la caractérisation des niveaux de gravité dans la zone d'inondation intense est rappelée dans le Tableau 4.

Niveau de gravité	Nombre de personnes ( <i>PAR</i> ) exposées à une inondation intense
5	> 30 000
4	] 3 000 ; 30 000 ]
3	] 300 ; 3 000 ]
2	] 30 ; 300 ]
1	≤ 30

Tableau 4 : Caractérisation des niveaux de gravité en fonction du nombre de personnes exposées à une inondation intense

La détermination des fourchettes retenues pour caractériser les niveaux de gravité est basée sur les éléments chiffrés utilisés pour le classement des systèmes d'endiguement :

- la borne supérieure du niveau de gravité le moins pénalisant est fixée au nombre minimal de personnes protégées par des systèmes d'endiguement de classe C, soit 30 personnes ; cette classe a été étendue jusqu'à 0 pour couvrir toutes les situations possibles ;

- la borne inférieure du niveau de gravité le plus pénalisant est fixée au nombre minimal de personnes protégées par des systèmes d'endiguement de classe A, soit 30000 personnes ; cette classe n'a pas de borne supérieure afin de couvrir toutes les situations possibles ;
- entre ces deux niveaux de gravité, chaque niveau correspond à un ordre de grandeur différent en termes de personnes exposées, ce qui conduit à une échelle à 5 niveaux.

### 3.2.2 CALAGE PAR RAPPORT AU NOMBRE DE PERSONNES EN SITUATION DE GRAND DANGER

L'échelle proposée pour la caractérisation de la gravité selon le nombre de personnes en situation de grand danger est rappelée dans le Tableau 5.

Niveau de gravité	Nombre de personnes ( $PAR_+$ ) en situation de grand danger
5	> 300
4	] 100 ; 300 ]
3	] 30 ; 100 ]
2	$\leq 30$
1	-

Tableau 5 : Caractérisation des niveaux de gravité en fonction du nombre de personnes exposées à un grand danger

Le niveau 5 de cette échelle a été établi sur la base du niveau 5 de l'échelle de caractérisation du Tableau 4. La correspondance entre les deux niveaux repose sur l'hypothèse que dans une configuration de grand danger, le rapport entre le nombre de victimes et le nombre de personnes exposées est environ 100 fois plus important que dans le cas normal. Ce rapport de 100 renvoie aux 2 ordres de grandeurs discutés dans le paragraphe 3.1 et a été jugé préférable à un rapport de 1000 utilisé dans la version A. Les niveaux de gravité inférieurs ont été obtenus par l'application d'un facteur 3 aux bornes de l'intervalle jusqu'au niveau de gravité G2. Le niveau de gravité G1 n'est pas considéré dans le cas d'une situation de grand danger.

## 3.3 CALIBRAGE DES CRITERES QUANTITATIFS UTILISES DANS LA METHODE

### 3.3.1 ZONE D'INONDATION INTENSE

Le critère d'intensité est basé sur la doctrine des Plans de Prévention des Risques Inondation<sup>12</sup> pour la qualification de l'aléa, qui est présentée dans le Tableau 6.

<sup>12</sup> La documentation française. Plans de préventions des risques naturels (PPR). Risques d'inondation. Guide méthodologique. 1999.

Vitesse	Faible (stockage)	Moyenne (écoulement)	Forte (grand écoulement)
Hauteur			
H < 0,50 m	Faible	Moyen	Fort
0,50 m < H < 1 m	Moyen	Moyen	Fort
H > 1 m	Fort	Fort	Très Fort

Tableau 6 : Qualification des aléas en fonction de la hauteur et de la vitesse

Les valeurs des seuils de vitesse ne sont données dans le guide que de manière indicative selon la règle suivante :

- vitesse faible : vitesse inférieure à  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$  ;
- vitesse moyenne : vitesse comprise entre  $0,2$  et  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$  ;
- vitesse forte : vitesse supérieure à  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ .

Le critère finalement retenu dans cette version est donc celui délimitant le niveau d'aléa faible et le niveau d'aléa moyen.

$$h_{max} \geq 0,5 \text{ m ou } v_{max} \geq 0,2 \text{ m.s}^{-1}$$

où  $h_{max}$  est la hauteur d'eau maximale  
et  $v_{max}$  est la vitesse de courant maximale

*Remarque 1 : Dans la version A, le critère qui avait été retenu était celui délimitant le niveau d'aléa moyen et le niveau d'aléa fort. Les expérimentations pratiques ont montré que la zone ainsi délimitée était souvent très restreinte par rapport à la zone inondée dans sa globalité. Ce critère méritait donc être abaissé pour correspondre davantage à l'objectif qui lui est attaché et qui consiste à représenter la masse des personnes impactées.*

*Remarque 2 : Pour information, des résultats d'expérience en vraie grandeur portant sur la stabilité de personnes adultes dans un écoulement sont présentés à la Figure 5. Ces résultats montrent que le critère retenu est largement sécuritaire. En réalité, un critère établi uniquement sur le seuil de hauteur  $h_{max} \geq 0,5 \text{ m}$  reste un critère potentiellement utilisable. Cette observation justifie en partie l'option laissée à l'étape 1 de la méthode de dégrader dans un premier temps le critère retenu en occultant la valeur de vitesse limite.*

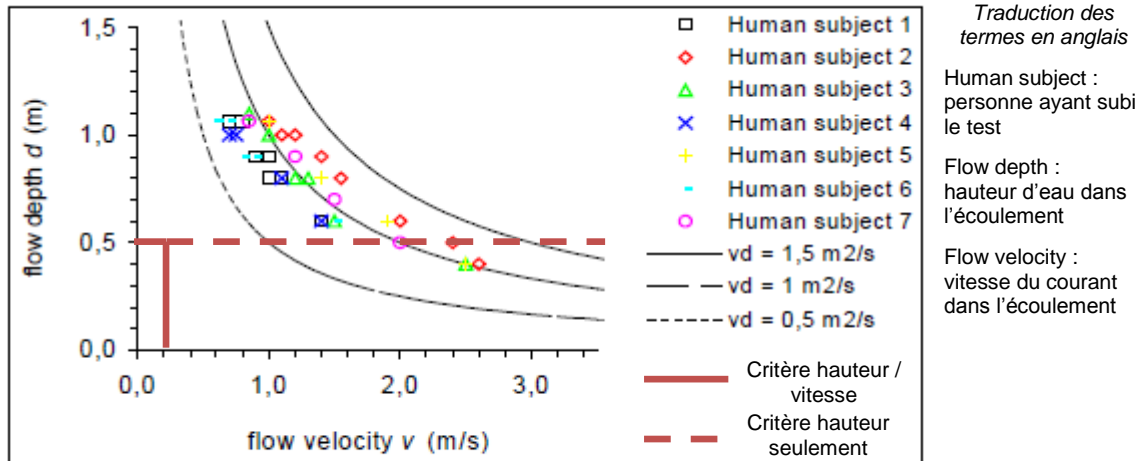


Figure 5 : Résultats des tests de stabilité d'une personne dans un écoulement d'eau caractérisé par sa hauteur et sa vitesse, tiré de RESCDAM<sup>13</sup>

### 3.3.2 ZONE DE GRAND DANGER

#### 3.3.2.1 CRITERE DE MONTEE RAPIDE DES EAUX

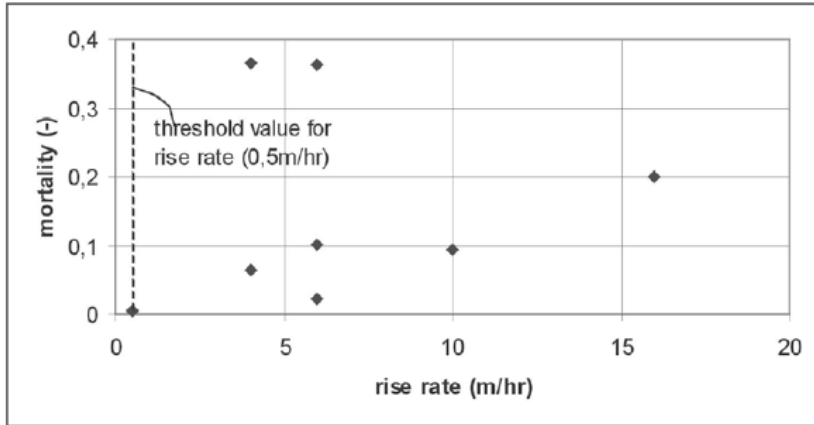
Le critère utilisé afin d'identifier les bâtiments pour lesquels la montée rapide des eaux est susceptible de conduire à une situation de grand danger est défini de la manière suivante :

$$h \geq 1,5 \text{ m en moins de 45 minutes}$$

où  $h$  est la hauteur d'eau

Ce critère est en partie issu des données publiées par Waarts et rapportées par Jonkman<sup>7</sup> à la Figure 6. Waarts (1992), à l'origine de ces données, avait fixé comme seuil de cinétique rapide la valeur de  $0,5 \text{ m.h}^{-1}$  tracé sur la Figure 6. Jonkman a discuté ce choix en indiquant que sur la base de ces seules données un seuil de  $4 \text{ m.h}^{-1}$  aurait également pu être retenu. Par ailleurs, d'autres auteurs néerlandais, Vrouwenvelder and Steenhuis (également cités dans Jonkman<sup>7</sup>) ont également fait mention dans leurs études de seuils de montée des eaux déterminés à dire d'experts, dont un seuil critique à  $2 \text{ m.h}^{-1}$ . Devant la faiblesse du retour d'expérience, Jonkman a finalement choisi la valeur  $0,5 \text{ m.h}^{-1}$  en préconisant davantage d'études pour fixer cette valeur seuil.

<sup>13</sup> RESCDAM. Final report of Helsinki University of Technology. The use of physical models in dam-break flood analysis. December 2000.



Traduction des termes en anglais

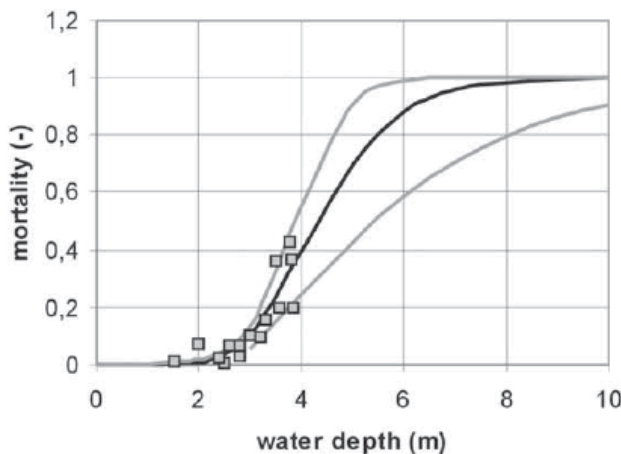
Mortality : mortalité (rapport entre le nombre de victimes et le nombre de personnes exposées)

Rise rate : vitesse de montée des eaux

Threshold value for rise rate : valeur seuil retenue pour définir une vitesse de montée des eaux rapide

Figure 6 : Rapport constaté entre le nombre de victimes et le nombre de personnes exposées en fonction de la vitesse de montée des eaux en différents lieux d'une inondation catastrophique, tiré de Jonkman<sup>7</sup>

Jonkman a également discuté du fait que l'importance de la vitesse de montée des eaux n'était réellement avérée que lorsqu'une certaine hauteur finale était atteinte. Le modèle qu'il propose à partir d'observations (Figure 7) fait ainsi apparaître le seuil de 2 m, voire 1,5 m. Le critère finalement retenu se base sur les valeurs de  $2 \text{ m.h}^{-1}$  pour la vitesse de montée des eaux et de 1,5 m pour la hauteur atteinte.



Traduction des termes en anglais

Mortality : mortalité (rapport entre le nombre de victimes et le nombre de personnes exposées)

Water depth : hauteur d'eau

Figure 7 : Rapport entre le nombre de victimes et le nombre de personnes exposées en fonction de la vitesse de montée des eaux et de la hauteur finale atteinte, (observations représentées par les carrés, Jonkman<sup>7</sup>)

*Remarque 1 : Dans la version A, le critère qui avait été retenu pour cette phase faisait référence aux valeurs de  $4 \text{ m.h}^{-1}$  pour la vitesse de montée des eaux et de 2 mètres pour la hauteur atteinte. Les expérimentations pratiques ont montré que l'utilisation de telles valeurs conduisait généralement à l'absence de zone concernée. Par conséquent, ce critère méritait d'être abaissé pour garder un intérêt dans la démarche globale.*

*Remarque 2 : Pour se positionner facilement par rapport à ce critère, il est important de disposer de cartographies réalisées avec un pas de temps compatible avec cette démarche. Un pas de temps de 15 minutes répond à cet objectif, tout en restant acceptable sur le plan pratique relatif à la production des cartographies.*

### 3.3.2.2 PRISE EN COMPTE DES PERSONNES EXPOSEES DANS LA ZONE A L'AVAL IMMEDIAT DES DIGUES

L'approche retenue dans cette version consiste à réaliser un comptage dans une bande située à l'aval immédiat des digues. Néanmoins, une brèche ne conduirait que localement à des valeurs très importantes de hauteur et vitesse et non sur tout le linéaire de la digue. Par conséquent, la méthode propose de pondérer le nombre total de personnes exposées dans cette zone par le ratio : longueur de la brèche / longueur du système d'endiguement.

Par ailleurs, afin de prendre en compte la mise en difficulté certaine de personnes en extérieur pris dans de tels écoulements, le comptage réalisé se base sur les bâtiments et les zones non bâties. Enfin, lorsque des bâtiments présents dans cette zone sont déjà comptabilisés au niveau des deux phases précédentes, il n'apparaît pas cohérent de les intégrer de nouveau dans cette phase. Cette approche est conservative. En effet, pour les deux phases 1 et 2, une personne supplémentaire se traduit nécessairement par une incrémentation d'1 unité du nombre  $PAR_+$ . En revanche, quand une personne est ajoutée en phase 3, du fait de l'utilisation de la densité dans le calcul, l'augmentation de  $PAR_+$  est inférieure ou égale à 1.

*Remarque : Dans la version A, la vulnérabilité du bâti avait été approchée en délimitant directement une zone à partir de la modélisation de l'onde de submersion, en utilisant un critère formulé en hauteur et vitesse. Cette approche n'était pas adaptée car généralement une seule brèche est modélisée pour un tronçon donné, ce qui ne donne pas de données représentatives à l'aval immédiat de la digue pour d'autres brèches.*



#### 4. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
A	Eléments techniques sur la tenue des bâtiments dans un écoulement	3



**ANNEXE A**  
**Éléments techniques sur la tenue des bâtiments dans un**  
**écoulement**



## ANNEXE A : ELEMENTS TECHNIQUES SUR LA TENUE DES BATIMENTS DANS UN ECOULEMENT

Cette annexe présente des éléments techniques sur la tenue des bâtiments dans un écoulement qui peuvent contribuer à préciser la distance à la digue permettant de délimiter la bande pour le comptage des personnes exposées à l'aval immédiat des digues. Ces éléments ne sont pas pris en compte dans la version B de la méthode mais sont repris pour mémoire dans cette annexe.

Certaines références internationales<sup>1,2</sup> proposent les critères suivants pour la tenue d'un bâtiment dans un écoulement :

*Destruction totale :  $v \geq 2 \text{ m.s}^{-1}$  et  $h.v \geq 7 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$*   
*Destruction partielle :  $v \geq 2 \text{ m.s}^{-1}$  et  $h.v \geq 3 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$*   
*(voire  $h > 2\text{m}$ )*  
 où  $v$  est la vitesse du courant et  $h$  la hauteur d'eau

Ces critères sont tracés schématiquement à la Figure 1 sur laquelle ils ont été linéarisés par morceaux.

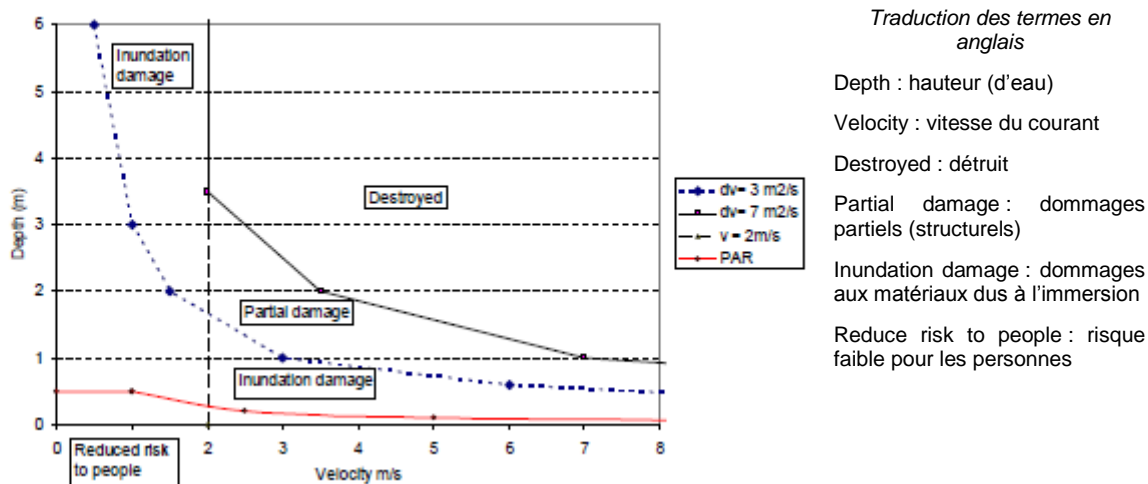


Figure 1 : Illustration des critères de dommages en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement, rapporté dans DEFRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Defra. Jacobs BBTIE. Supplement No 1 to interim guide to quantitative risk assessment for UK reservoirs. May 2006.

<sup>2</sup> RESCDAM. Final report of Helsinki University of Technology. The use of physical models in dam-break flood analysis. December 2000.

Ces deux critères peuvent être confrontés avec les résultats d'une étude réalisée par le CSTB sur la tenue des bâtiments situés dans l'onde de submersion suite à la rupture de digues<sup>3</sup>. Cette étude porte sur la tenue des murs de façade directement sollicités par un écoulement caractérisé par une hauteur d'eau et une vitesse de courant. Les calculs du CSTB différencient les bâtiments standard à un et à deux niveaux :

- pour les bâtiments standards à un niveau, aucune perte d'intégrité des murs n'est à considérer si une ouverture de type porte joue un rôle de fusible permettant de considérer un équilibre des pressions de part et d'autre des murs. On retrouve ainsi schématiquement le seuil des 2 mètres d'eau proposée dans le critère illustré à Figure 1. En revanche, si le rôle fusible des portes n'est pas retenu, ce qui est plutôt improbable, les calculs conduisent à retenir des valeurs seuils beaucoup plus faibles que celles proposés par les références internationales.
- pour les bâtiments standards à deux niveaux, en prenant en compte l'introduction de l'eau au rez-de-chaussée, la perte d'intégrité des murs suit à peu près les règles suivantes pour des vitesses supérieures à 2 m/s :
  - $h.v > 2,5 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  pour la maçonnerie récente ;
  - $h.v > 4 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  pour la maçonnerie ancienne ;
  - $h.v > 6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  pour le béton armé.

Il ressort donc que les deux critères indiqués ci-avant encadrent les résultats obtenus par le CSTB, dans le cas probable où l'eau s'introduit rapidement au rez-de-chaussée. Il est important de noter que les calculs du CSTB ne traitent que la sollicitation mécanique des murs et qu'ils n'abordent pas la problématique de l'érosion des fondations qui peut être prépondérante dans les mécanismes de destruction du bâti notamment lorsque les surfaces ne sont pas revêtues.

Sur le sujet de l'érosion des fondations, des références aux modèles d'affouillement en cas de tsunami peuvent être intéressantes. Ces modèles fournissent quelques considérations empiriques dans l'objectif d'évaluer la profondeur d'affouillement au pied de structures bâtementaires soumises à l'écoulement d'un tsunami. Les approches présentées restent très globales dans la mesure où la profondeur d'affouillement dépend de nombreux facteurs tels que le caractère turbulent de l'écoulement et sa densité, la présence d'obstacles intermédiaires (arbres,...), la topographie du terrain et ses caractéristiques granulométriques, etc. Les résultats fournis par ces approches ne constituent donc que des ordres de grandeur de la profondeur d'affouillement.

La courbe de la Figure 2 donne ainsi un ordre de grandeur de la profondeur d'affouillement maximale en fonction de la vitesse de l'écoulement en cas de Tsunami.

---

<sup>3</sup> CSTB. Vulnérabilité des bâtiments vis-à-vis d'inondations dues à la rupture des digues de la Garonne, dans la ville de Toulouse. 2008

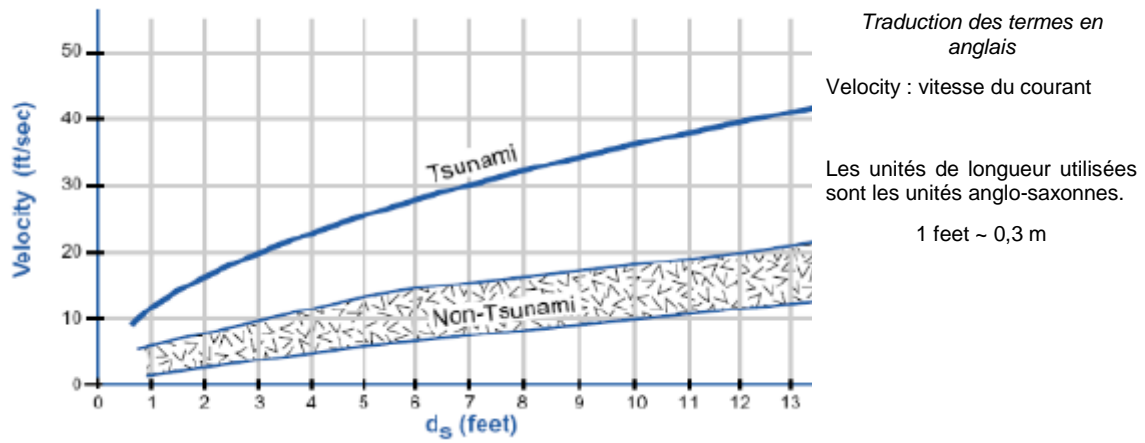


Figure 2 : Vitesse d'écoulement nécessaire pour atteindre une profondeur d'affouillement donnée  $d_s$ , d'après FEMA<sup>4</sup>

<sup>4</sup> FEMA . Coastal Construction Manual 2000, cité dans Tsunami inundation scour of roadways, bridges and foundations. EERI/FEMA NEHRP 2006 Professional Fellowship report.





**INERIS**

*maîtriser le risque  
pour un développement durable*

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

Parc Technologique Aiaia  
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>