

NIVEAU DE SURETE DES DIGUES UN OUTIL POUR L'EVACUATION MASSIVE DU VAL D'ORLÉANS EN CAS DE CRUE MAJEUR DE LA LOIRE

Article a été présenté au Congrès SHF : «Evènements extrêmes fluviaux et maritimes», Paris, 1-2 février 2012

MAURIN J.¹, FERREIRA P.², TOURMENT R.³, BOULAY A.⁴

¹ Ministère de l'écologie (MEDDTL) direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement (DREAL) du Centre - jean.maurin@developpement-durable.gouv.fr

² Préfecture du Loiret - Direction Départementale des Territoires (DDT) - Patrick.Ferreira@loiret.gouv.fr

³ Cemagref - Aix en Provence - remy.tourment@cemagref.fr

⁴ Ministère de l'écologie (MEDDTL) direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement (DREAL) du Centre - arnaud.boulay@developpement-durable.gouv.fr

Résumé : Plus de 300 000 personnes habitent dans les zones menacées par les crues majeures de la Loire, protégées derrière 600 km de hautes digues. En cas de rupture d'une de ces digues, des milliers de vies humaines seraient directement menacées. Comment réagir face à un phénomène extrême pour mettre à l'abri la population ?

Une évacuation préventive des populations les plus exposées au risque de brèche s'impose donc.

Le dispositif repose avant tout sur un indicateur clair permettant de prendre la décision d'évacuation, et sur une organisation préparée préalablement pour donner le plus de chance de réussite à cette opération de grande envergure.

L'exemple du val inondable concernant la partie sud de l'agglomération d'Orléans, protégé par la levée du val d'Orléans, illustre cette démarche. En cas de crue majeure de la Loire, un niveau de sûreté de la digue a été défini. En effet la hauteur de la digue présentant un niveau apparent de protection ne suffit pas à garantir le val d'une éventuelle brèche dont les conséquences seraient catastrophiques. L'évacuation préventive et massive reste la seule solution pour garantir la sécurité des 70.000 personnes habitant ce secteur.

Le préfet du Loiret et ses services ont mis au point ce dispositif en concertation avec les différents acteurs locaux, ce projet constitue un exemple pour les autres agglomérations ligériennes (Tours, Angers, Blois, etc.).

Mots-Clés : crues majeures, risques de brèches, val inondable, dispositif de concertation

Abstract : More than 300 000 people live in the zones threatened by the major flood of the Loire, protected behind 600 km from high levees. In case of breach in one of these levees, the thousands of human lives would be threatened directly. How to react facing an extreme phenomenon to put to the shelter the population?

A preventive evacuation of the populations the more exposed to the risk of breach imposes itself therefore.

The device rests above all on a clear indicator permitting to take the decision of evacuation, and on an organization prepared previously to give the more of success luck to this large-scale operation.

The example of the valley inundable concerning the south part of Orleans's agglomeration protected by the levee of the valley of Orleans illustrates this gait. In case of major rise in the water level of the Loire, a level of safety of the levee has been defined, indeed the height of the levee presenting a protective obvious level is not sufficient to guarantee the valley of a possible breach whose consequences would be catastrophic. The preventive and massive evacuation remains the only solution to guarantee the security of the 70.000 people living in this sector.

The prefect of Loiret and his services finalized this device in dialogue with the different local actors, this project constitutes an example for the other ligérian agglomerations (Tours, Angers, Blois...).

Keywords : major flood, risk of breach, inundable valley, device in dialogue

INTRODUCTION

Les levées de la Loire sont des ouvrages linéaires anciens. Issues de surélévations successives, elles présentent de très fortes hétérogénéités qui leur confèrent une fragilité structurelle, les rendant dangereuses bien avant que le niveau de l'eau en crue n'atteigne leur sommet.

On introduira donc deux notions importantes pour la compréhension du fonctionnement des digues, le niveau de sûreté et le niveau de protection.

Le niveau de sûreté se définit comme le niveau d'eau dans le cours d'eau au-dessus duquel la probabilité de rupture de l'ouvrage n'est plus considérée comme négligeable.

Le niveau de protection est le niveau d'eau dans le cours d'eau pour lequel la digue ne protège plus la zone en arrière. Il s'agit concrètement du niveau pour lequel interviennent les premières surverses ou si le système d'endiguement est doté d'un déversoir, du niveau du fonctionnement de ce déversoir.

1. SECURITE DES LEVEES DE LOIRE

Un ouvrage de protection moderne, rigoureusement construit, est conçu pour que le niveau de sûreté soit supérieur au niveau de protection. Le calcul aux états limites ultimes, garantit la résistance de la digue ainsi conçue en tout point jusqu'à la surverse.

Les ouvrages anciens construits depuis des siècles n'ont pas été conçus ainsi. Ils résultent d'un savoir empirique, déterminé par l'expérience et l'observation des phénomènes : après chaque crue destructrice les autorités ont reconstruit des ouvrages un peu plus solides et un peu plus hauts.

Sur la Loire, les crues importantes (on dénombre plus d'une vingtaine de crues destructrices en cinq siècles) ont toujours provoqué des brèches catastrophiques au travers des levées. Ces levées ont été construites à partir du moyen âge et ont été relevées après chaque crue jusqu'au XIX^e siècle pour réaliser au final des ouvrages dont la hauteur peut atteindre huit mètres localement. Leur rupture entraînerait un tel déferlement d'eau dans le val que la sécurité des habitants serait fortement compromise. En effet la recherche d'éléments historiques a permis de déterminer que le débit entrant dans le val après rupture (brèche de Jargeau en 1856) a atteint 2400 m³/s pendant plusieurs heures [Maurin, al – 2011].

Les enjeux humains protégés, aujourd'hui, par les levées de la Loire sont si importants qu'il est nécessaire de prévoir une évacuation préventive massive bien avant que les signes avant-coureurs de faiblesse de la digue soient observés [Goutx, al - 2010]. En effet, une brèche se produit en quelques heures après l'observation des premiers indices. Au XIX^e siècle, on a ainsi pu constater que le temps d'ouverture de la brèche pouvait être réduit à deux heures. Ce délai est incompatible avec une évacuation massive de plusieurs milliers de personnes.

La décision d'évacuation doit donc intervenir bien avant que les levées soient susceptibles de rompre. Il est donc nécessaire de définir un niveau d'eau au-dessus duquel la sécurité n'est plus assurée. Si les estimations du service de prévision des crues conduisent à dépasser ce niveau de sûreté, alors la décision d'évacuation doit être prise. Compte tenu de l'outil de prévision existant, cette décision peut intervenir plus de 48 heures avant que le niveau soit réellement atteint, ce qui permet de réaliser l'évacuation dans un délai permettant de mener l'ensemble des opérations nécessaires dans des conditions réalistes et acceptables.

C'est le niveau de sûreté qui est choisi comme niveau d'évacuation, il est donc primordial de le définir le plus finement possible. Sous-évalué, il conduira à évacuer inutilement, sur-évalué, il conduirait à exposer la population à un risque majeur.

2. HETEROGENEITE DES LEVEES DE LOIRE

Les levées de la Loire ont été construites à partir du moyen âge, initialement discontinues, elles rejoignaient des tertres. Elles étaient constituées de branchage et de terre. On les appelait alors des turcies. Dans un premier temps, leur objectif était d'assécher des marais et de donner des terres arables pour l'agriculture. En effet, les vals inondables de Loire offraient de vastes étendues propices à cet usage. Au fur et à mesure du temps et des crues, les turcies se sont élevées en levées plus solides et sont ainsi devenues des ouvrages structurés et continus. Les ouvrages ont été élevés sur eux-mêmes sans destruction de l'ouvrage précédant. Ainsi on note une hétérogénéité importante dans le profil en travers.

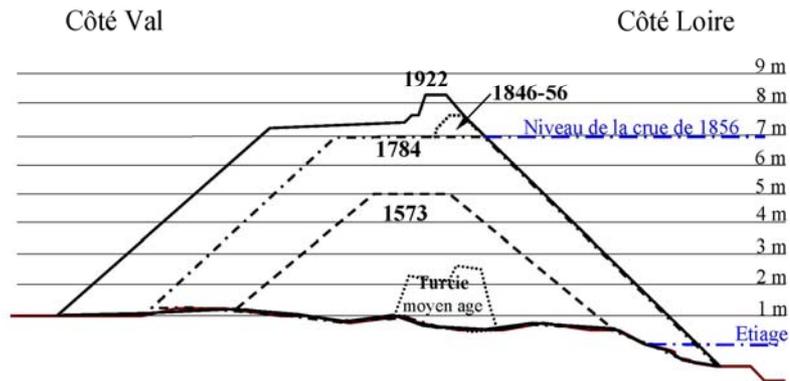


Figure 1 : profil en travers type des levées de Loire au début du XX^e siècle d'après [Dion – 1934]

Chaque levée de la Loire a connu de très nombreuses brèches qui ont détruit la levée mais aussi sa fondation jusqu'à plus de 10 mètres de profondeur.



Figures 2 et 3 : photos des brèches dans les levées de Loire en 1866

La reconstruction des levées après les brèches s'est faite dans des conditions souvent très difficiles notamment du fait de la présence d'eau dans la fosse ou du nombre important de chantiers à mener en même temps (chaque crue du XIX^e siècle a provoqué plus de 160 brèches en Loire Moyenne).

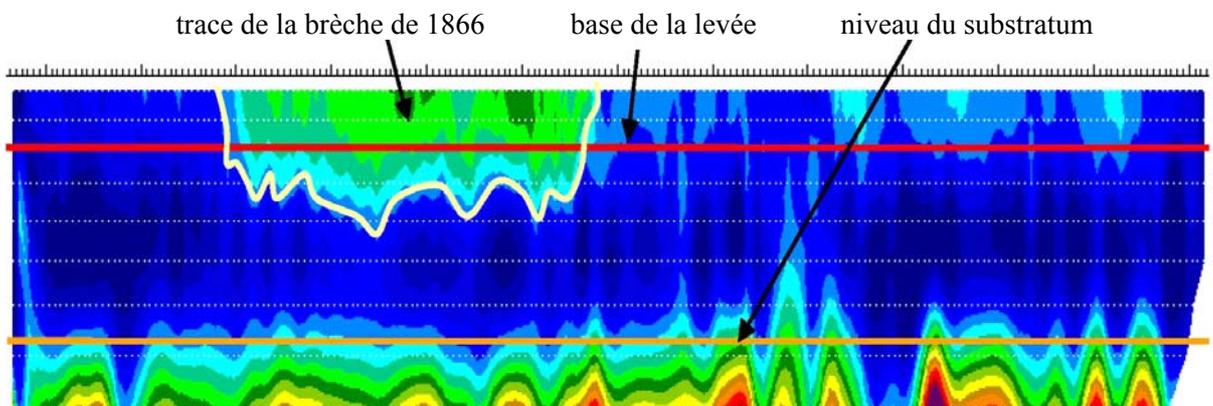


Figure 4 : profil en long de la levée de Jargeau – brèche de 1866 [Géophysique-BRGM-2008]

En 1160, à la demande des propriétaires terriens, Henri II Plantagenêt fait installer des « hôtes » sur les digues, chargés de les entretenir. Cette tradition s'est perpétuée. Aujourd'hui encore, on trouve de nombreuses maisons encastrées dans les levées. Celles-ci constituent des points de faiblesse évidents.



Figures 5 et 6 : photos de maisons encastrées dans la levée d'Orléans

Un phénomène plus récent est venu fragiliser les levées de la Loire. L'exploitation massive du sable de la Loire entre 1950 et 1990 a entraîné un enfoncement de son lit de 1 à 3 mètres et ainsi découvert les soubassements des levées situées en contact du fleuve, leurs fondations sont ainsi menacées par l'érosion latérale de la Loire.

L'urbanisation des zones protégées a par ailleurs conduit à construire de nombreuses canalisations dans les voiries et notamment dans celles qui existent au sommet des digues. Les levées sont donc aujourd'hui parcourues de nombreux ouvrages qui peuvent favoriser l'érosion interne. On a ainsi découvert récemment une levée traversée par une tranchée d'assainissement entièrement remblayée en sable propre de perméabilité de 10^{-4} m/s, alors que les levées sont constituées de sables limoneux de perméabilité de 10^{-6} à 10^{-7} m/s. Une telle situation est de nature à provoquer une rupture de la levée pour une charge très faible. Le sable autorise la circulation de l'eau dans la levée et il est très susceptible à l'érosion. La constitution d'un renard hydraulique est quasi-certain dans ce cas.

3. METHODE DE DETERMINATION DU NIVEAU DE SURETE D'UNE DIGUE

Les études de dangers prévues par le décret 2007-1735 du 11 décembre 2007¹ ont notamment pour objectif de définir le niveau de sûreté de chaque système d'endiguement. La probabilité de rupture de la digue sera alors définie pour chaque section de digue, pour chaque mode de rupture identifié et pour chaque niveau de crue. Ces études reposent sur une approche multiple prenant en compte l'hydraulique, la géomorphologie, la géotechnique, une approche historique, qui est comparée au relevé exhaustif des caractéristiques dimensionnelles des ouvrages et de ses faiblesses identifiables. Avec les résultats de ces études, il sera possible de définir le débit à partir duquel le niveau de sûreté de la digue sera atteint et ainsi de définir le seuil d'évacuation de chacun des vals protégés.

En attendant les résultats des premières études de dangers fin 2012 pour les digues de classe A et fin 2014 pour celles de classe B et C, il est nécessaire d'approcher au mieux le niveau de sûreté de chaque digue, afin de donner aux services de protection civile les éléments nécessaires pour organiser le plan d'évacuation des vals urbanisés protégés par ces digues.

La méthodologie de définition provisoire de ces niveaux repose sur l'application de la formule de Bligh pour définir le niveau de sûreté en fonction de la géométrie de la levée.

¹ Pour les digues de classe A, (h > 1 m et protégé plus de 50000 habitants), B (h > 1 m, 1000 habitants) et C (H > 1 m, 10 habitants)

La formule de Bligh s'écrit :

$$L > k \times H$$

où L est la largeur à la base de la digue, H indique la hauteur de la digue et k est un coefficient qui dépend de la nature des matériaux de la digue. Pour les levées de la Loire k est pris égal à 8 [NEDECO, 1965].

Le principe retenu est de mesurer la largeur de la digue à sa base ou en un niveau pertinent puis d'en déduire la hauteur d'eau sous laquelle la digue est capable de résister en appliquant la formule de Bligh. Le niveau de sûreté est déduit en ajoutant la hauteur calculée au niveau de la base.

$$Z_{ns} = Z_b + H \text{ avec } H = L/k$$

où Z_{ns} est la cote du niveau de sûreté et Z_b la cote de la base de la digue ou du niveau pertinent.

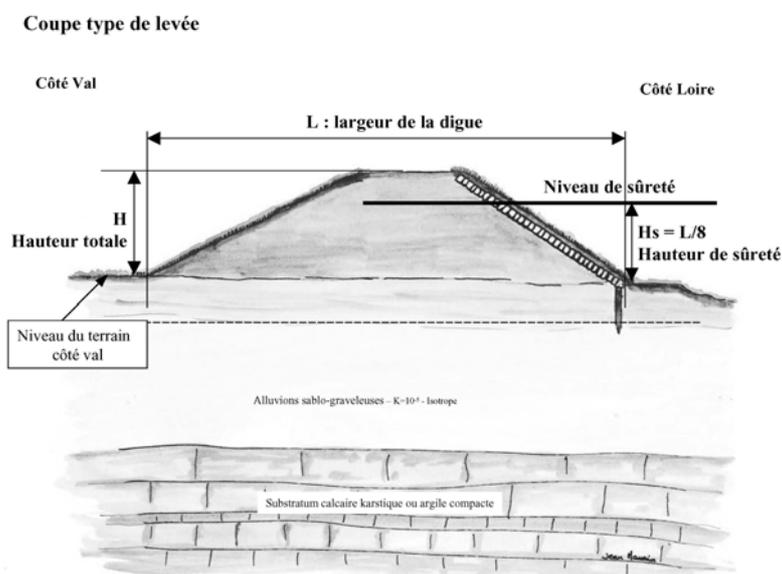


Figure 7 - Schéma de détermination du niveau de sûreté pour une digue par la formule de Bligh

Le traitement des sections particulières de digues présentant des maisons encastrées est ramené au cas précédent, en considérant que le bâtiment est fondé à l'aplomb de la façade jusqu'aux fondations de la digue, la largeur de la levée est donc limitée à l'aplomb de la façade de la maison. Cette situation est très pénalisante pour la levée du fait de la présence de la maison mais aussi en raison de la présence de canalisations enterrées mises en place pour la viabiliser. On peut même citer des cas extrêmes où on a retrouvé une cave et un puits dans le corps de la levée.

Coupe type de la levée d'Orléans, non renforcée avec maison encastrée

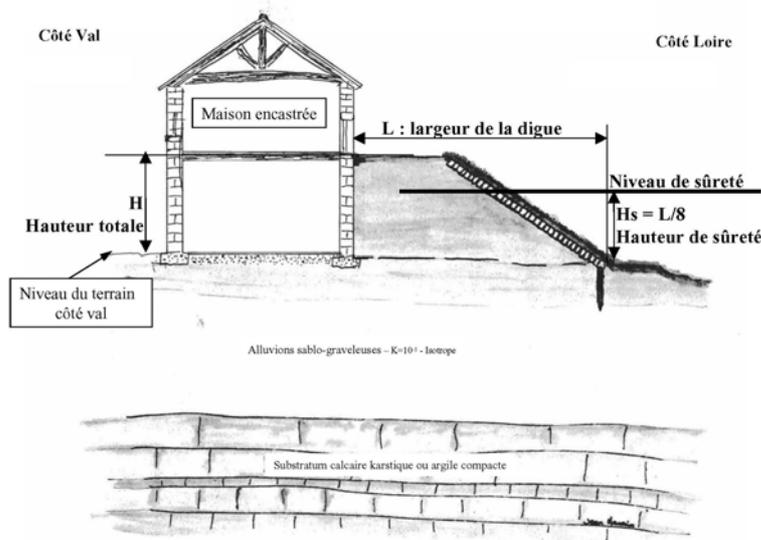


Figure 8 - Schéma de détermination du niveau de sûreté pour un bâtiment encastré dans la digue

Pour tenir compte de la présence de nombreuses canalisations longitudinales et transversales dans les digues (en moyenne une par kilomètre), une revanche de un mètre est déduite systématiquement de la hauteur totale pour définir le niveau de sûreté.

La présence de végétation ligneuse dans les digues et de karsts connus dans le substratum calcaire sous la digue est prise en compte « à dire d'expert » dans l'attente des études de dangers.

La présence de terriers d'animaux est analysée avec la plus grande précaution, un terrier de blaireau est susceptible d'avoir des ramifications de part et d'autre de la digue. La digue est alors fragilisée par la présence d'un cheminement hydraulique préférentiel conduisant à la ruine rapide de l'ouvrage. Dans ces conditions, la rupture de la digue est probable dès que le niveau du terrier est atteint. Le niveau de sûreté peut alors être très bas, dans l'attente d'une réparation.

Pour mettre en œuvre la méthode, on détermine, à partir de photos aériennes de la digue, les zones critiques nécessitant un calcul spécifique (maisons encastrées, zones non renforcées, etc.). Une visite de la digue est nécessaire pour confirmer les observations et pour déterminer les faiblesses non visibles à partir des photos aériennes. C'est le gestionnaire de la digue qui s'en charge en s'appuyant si nécessaire sur des études complémentaires.

Pour chacune des zones de faiblesse identifiées, la formule de Bligh est appliquée. On obtient ainsi un niveau de sûreté propre au profil étudié à une abscisse définie. Une fois toutes les zones expertisées, on représente chacun des profils sur un profil en long de la digue où sont indiqués le sommet de la digue, les points représentant les niveaux de sûreté de chaque profil (abscisse, Z_{ns}) ainsi que les lignes d'eau modélisées pour les différentes crues de référence. Pour la Loire, on utilise le modèle Loire Moyenne [Equipe pluridisciplinaire du plan Loire Grandeur Nature ; Hydratec, 1998] qui a modélisé les crues de temps de retour 50 ans à 500 ans.

Le niveau de sûreté de l'ensemble du système d'endiguement est déterminé graphiquement sur le profil en long de la levée où figurent les lignes d'eau des crues caractéristiques et les représentations des niveaux de sûreté des profils singuliers obtenus par cette approche.

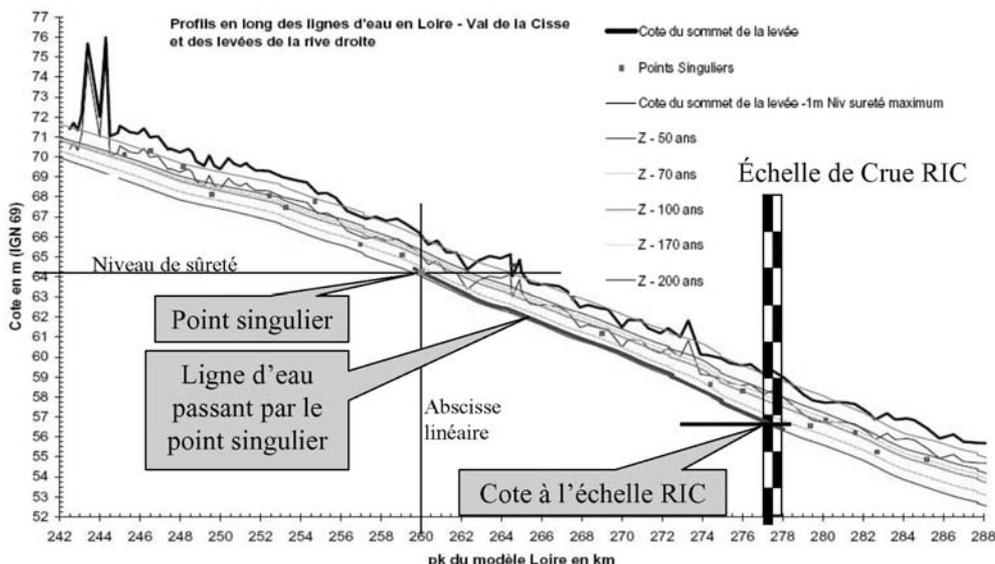


Figure 9 - Schéma de détermination du niveau de sûreté sur l'ensemble du système d'endiguement

Le point le plus bas relativement aux lignes d'eau détermine le niveau de sûreté global de la digue.

L'analyse ainsi réalisée a permis de définir des niveaux de sûreté sur chaque val inondable de la Loire Moyenne. On note que le niveau de protection réel obtenu est hétérogène et que certains vals habités ne sont protégés que pour des crues d'occurrence relativement faibles.

Tableau 10 - tableau des niveaux de sûreté sur les vals principaux de la Loire Moyenne

Val	Classe	Echelle ² RIC	Niveau de Sûreté		Niveau de protection
			Cote ³ m	Débit ⁴ m ³ /s	Débit m ³ /s
Orléans	A	Orléans	4.60	4 200	6 000
Blois – Vienne	B	Blois	5.40	4 400	6 500
Cisse	B	Blois	4.30	3 500	6 500
Tours	A	Tours (Mirabeau)	7.30	4 900 ⁵	6 500
Langeais	B	Langeais	6.00	4 800	6 500
Bréhémont	B	Langeais	4.80	3 500	4 200

4. EVACUATION DU VAL D'ORLEANS

Le plan d'évacuation du val d'Orléans est le premier plan abouti qui repose sur ce concept : évacuer préventivement la population sur la base d'un niveau de sûreté qui sera atteint plusieurs jours plus tard.

² RIC : règlement d'information sur les crues élaboré par le SPC service de prévision des crues

³ Cotes calculées à partir du modèle HYDRA Loire Moyenne LM98,

⁴ Débits calculés sur la base de donnée « BAREME » du SHPEC/DHMD

⁵ Débit calculé à partir d'Hydra LM98

Cette démarche présente l'avantage de laisser le temps aux autorités d'organiser cette évacuation avec un dispositif pré-établi qui garantit au mieux les conséquences du comportement des habitants du val inondable.

L'intérêt de ce plan est qu'il est adaptable au niveau de sûreté qui peut varier en fonction de la connaissance et des travaux d'amélioration du système endigué. L'État et les collectivités locales concourent en ce sens dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature.

CONCLUSIONS

L'étude des niveaux de sûreté des digues de la Loire va permettre aux services de protection civile de déterminer un seuil à partir duquel la sécurité des habitants en arrière des digues n'est plus assurée. Ce seuil est indispensable à une prise de décision par les autorités. Cette étude préalable des niveaux de sûreté des digues de Loire est également un outil essentiel pour déterminer les secteurs les plus fragiles et ainsi orienter la programmation des travaux de renforcement. Après cette étude, un chantier sur la levée de la Cisse (département du Loir-et-Cher) a pu être programmé en urgence. La réparation mise en oeuvre permettra de remonter le niveau de sûreté de 500 m³/s, portant ainsi le seuil d'évacuation d'une crue de période de retour inférieur à 50 ans à une de plus de 100 ans.

Les études de dangers actuellement en cours pourront apporter des précisions précieuses en prenant en compte tous les modes de ruptures probables et en systématisant l'analyse sur tous les profils de la levée avec un pas d'analyse inférieur à cent mètres.

TABLEAUX ET FIGURES

Figure 1 : profil en travers type des levées de Loire au début du XX^e siècle d'après [Dion – 1934]

Figures 2 et 3 : photos des brèches dans les levées de Loire en 1866

Figure 4 : profil en long de la levée de Jargeau – brèche de 1866 [Géophysique-BRGM-2008]

Figures 5 et 6 : photos de maisons encastrées dans la levée d'Orléans

Figure 7 : schéma de détermination du niveau de sûreté pour une digue par la formule de Bligh

Figure 8 : schéma de détermination du niveau de sûreté pour un bâtiment encastré dans la digue

Figure 9 : schéma de détermination du niveau de sûreté sur l'ensemble du système d'endiguement

Tableau 10 - tableau des niveaux de sûreté sur les vals principaux de la Loire Moyenne

REFERENCES ET CITATIONS

DIREN Centre (2002) - MNT - Lidar de la Loire Moyenne.

DELFT, (1965) - Considérations théoriques concernant la stabilité des digues de la Loire lors de niveaux d'eau exceptionnellement élevés - étude NEDECO.

Equipe Pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature, Hydratec (1998) - modèle Loire Moyenne.

GOUTX D., REINBOLD D., VALETTE J.P., MAURIN J., FERREIRA P. (2010) - Prise de décision d'évacuation des populations protégées par une digue lors d'une crue majeure de la Loire – exemple du Val d'Orléans *la houille blanche* 2011 n°3, 29-35.

MAURIN J., BOULAY A., SCHUMACHER M. (2011) - Étude des niveaux de sûreté des digues de la Loire.

MAURIN J., CULLERIER P. (2008) - Étude sur le comportement des ouvrages de l'endiguement du val d'Orléans val d'Orléans en cas de crue forte.