

Études de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux dans le delta du Rhône

Hazards studies of river levees systems in the Rhône Delta

T. Mallet¹, C. Dast¹, M. Requi¹, S. Chardès¹, A. Castagnet¹, J.J. Fry²

¹SYMADREM, Arles, thibaut.mallet@symadrem.fr

²EDF-CIH, Le Bourget du Lac, jean-jacques.fry@edf.fr

Résumé

Les études de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux dans le delta du Rhône, s'inscrivent dans le cadre de la nouvelle réglementation « digues » de 2015 et du programme de travaux porté par le SYMADREM [1]. Ces études portent sur l'ensemble des ouvrages constituant les systèmes (225 km de digues, 350 ouvrages hydrauliques et 30 batardeaux manœuvrables en crue). Les zones protégées par ces systèmes couvrent une superficie de 1 500 km², où vivent plus de 115 000 personnes.

Quatre scénarios d'inondation, en provenance du système d'endiguement, ont été abordés. Trois concernent les risques incrémentaux (brèche avant surverse ; brèche après surverse ; défaillance des organes de fermeture des ouvrages traversants (vannes, batardeaux...)) et un scénario traite du risque lié à la surverse sans brèche.

Pour l'évaluation des risques, un modèle probabiliste a été mis en œuvre. Ce choix a été motivé par la composition très hétérogène des digues, due aux phases successives de construction (effet mille-feuille) [4] mais également de leur fondation, compte tenu des multiples changements de tracés que le Rhône a connus dans son histoire [5]. Cette hétérogénéité rend illusoire le caractère déterministe d'un facteur de sécurité. Treize scénarios de brèche, définis à partir de l'étude accidentologique ont ainsi pu être évalués. Des courbes de fragilité ont été construites tous les 125 m de digues et ont permis de déterminer les trois niveaux caractéristiques des ouvrages (protection, sûreté et danger).

Des scénarios d'inondation par brèche quand le niveau de sûreté était dépassé ou sans brèche quand ce dernier n'était pas dépassé ont été modélisés pour déterminer les niveaux de protection au sein de la zone protégée et la dangerosité des venues d'eau au-delà du niveau de protection. L'article conclut sur la phase indispensable d'appropriation, (en cours) des résultats de l'étude par les autorités compétentes en matière de secours.

Mots-Clés

Étude de dangers, Risque, Probabilité, Protection, Sûreté, Danger.

Abstract

Hazards studies of river levees systems in the Rhone delta are part of the new "levees" regulation of 2015 and the program of works carried out by SYMADREM [1]. These studies concern all the structures constituting the systems (225 km of levees, 350 hydraulic structures and 30 closing gates maneuverable in flood). The areas protected by these systems cover an area of 1500 km², where 115 000 people live.

Four inundation scenarios from the levees system were studied. Three are related to incremental risks (breach before overflow, breach after overflow, failure of crossing structures with closing gates) and one scenario deals with overflow without breach.

For risk evaluation, a probabilistic model has been implemented. This choice was motivated by the heterogeneous facies of the levees, due to the successive stages of their construction [4] and the heterogeneities of their foundations due to multiple changes of the Rhône bed [5]. This heterogeneity makes the deterministic approach of a safety factor illusory.

13 breach scenarios, defined from the accidentology study, have been evaluated. For each levee section spaced from 125 m, fragility curves were defined and allowed to determine the three characteristic levels of structures (protection, safety and danger).

Inundation scenarios were simulated with breach, when the safety level was exceeded or without breach when it was not exceeded, to determine the levels of protection within the protected area and the danger of water inflows beyond the level of protection.

The paper concludes on the essential phase of appropriation, (in progress) by the authorities in charge of crisis management.

Key Words

Hazards Study, Risk, Probability, Protection, Safety, Danger.

Introduction

L'étude de dangers des digues et des barrages a été introduite par la loi sur l'eau de 2006 et traduite sur le plan réglementaire en 2007 et 2008 par respectivement un décret et plusieurs arrêtés, dont un définissant le contenu et le plan de l'étude de dangers (EDD). Depuis 2015 et la parution du décret « digues », il est demandé aux gestionnaires de réaliser les études de dangers non plus à l'échelle des ouvrages, mais à l'échelle des systèmes d'endiguements cohérents sur le plan hydraulique et de déterminer les niveaux de protection des zones ou sous-zones protégées par ce système. Pour l'application de cette nouvelle réglementation, une méthodologie reposant sur une évaluation probabiliste a été mise en œuvre par le Symadrem avec l'appui technique du CIH d'EDF. La communication comprend 7 chapitres : le 1^{er} présente le contexte, le 2^e rappelle les objectifs de la réglementation, le 3^e expose la méthodologie générale de l'étude de dangers, le 4^e chapitre détaille la méthodologie utilisée pour déterminer les probabilités conditionnelles et annuelles de brèches ; le 5^e chapitre expose le passage des niveaux de protection des ouvrages aux niveaux de protection des zones protégées ; le 6^e chapitre traite de la mise en sécurité préventive des populations et de la coordination nécessaire entre le gestionnaire de digue et les services de secours ; le 7^e chapitre conclut sur les enseignements de l'étude et justifie a posteriori de la nécessité de conforter les digues du delta, compte tenu des enjeux et des limites opérationnelles de l'évacuation préventive.

Contexte

Le Delta du Rhône couvre une superficie de 1 500 km². Il est protégé par trois systèmes d'endiguement fluviaux et un système d'endiguement fluvio-maritime constitués respectivement de 225 km de digues fluviales et de 50 km de digues maritimes. Ces systèmes sont traversés par environ 30 passages batardables, 350 ouvrages hydrauliques manœuvrables en crues et 125 réseaux secs ou humides. La population protégée par ces systèmes est estimée à 115 000 personnes (résidents permanents). Elle peut doubler, voire tripler en période estivale.

Le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Digues du Delta du Rhône et de la Mer (Symadrem), est un établissement public qui regroupe deux régions, deux départements et six établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre (EPCI-FP). Il gère la majeure partie des ouvrages, à savoir : 210 km de digues fluviales et 25 km de digues maritimes. La gestion des autres

ouvrages (remblais ferroviaires, remblais portuaires, écluses, routes, digues privées) est répartie entre différents acteurs avec qui le Symadrem a conventionné pour être à l'horizon 2020, le gestionnaire unique des quatre systèmes d'endiguement.

Les systèmes ont été créés après les crues de 1840 et 1856 (périodes de retour très supérieures à 100 ans) en lieu et place d'autres ouvrages encore plus anciens, dont certains remontent au XII^e siècle. Du fait de leur mode de réalisation (compactage manuel avec des dames de 15 kg, non prise en compte de la teneur en eau à l'optimum découverte en 1933 par Ralph Proctor) et de l'effet « mille-feuilles » dû aux phases successives de rehaussement, les digues du Rhône sont fortement exposées au risque de brèche par érosion interne.

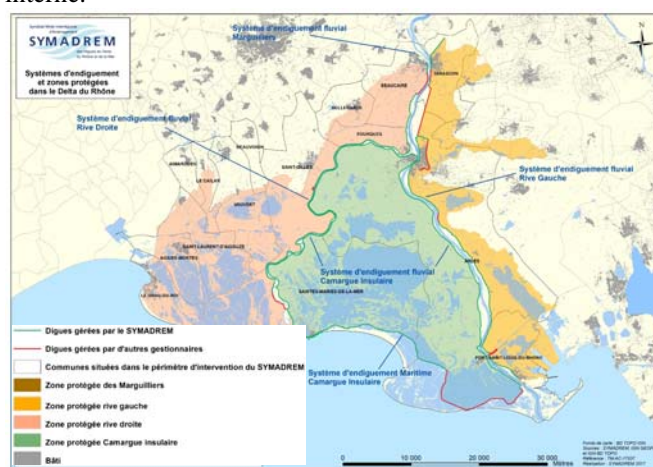


FIGURE 1 : SYSTEMES D'ENDIGUEMENT DANS LE DELTA DU RHONE

La probabilité de brèche devient significative dès les premières sollicitations du fleuve et croît sensiblement avec le débit et la durée de la crue. Les crues de 1993, 1994, 2002, 2003 et 2016 ont montré que les digues pouvaient céder bien avant que l'eau n'atteigne la crête. Sur les 29 brèches et départs de brèche recensés sur la période 1993-2016, 83 % des accidents ont été initiés par érosion interne et 17 % par surverse.

Compte tenu de l'ampleur de son territoire, de la volonté de disposer d'une évaluation homogène du risque sur l'ensemble de son territoire et de la nécessité de mettre à jour régulièrement les études, compte tenu de la dynamique de travaux liés au Plan Rhône [1], le Symadrem a fait le choix de réaliser en régie ces études de dangers.

Dans le cadre de la nouvelle réglementation et plus particulièrement de l'article R.562-14 du code de l'environnement, les systèmes d'endiguement sont progressivement autorisés. Le système d'endiguement (SE) fluvial « rive gauche » a été autorisé le 24 avril 2018 dans le cadre d'une procédure d'autorisation de travaux. La demande d'autorisation du SE fluvial « Camargue Insulaire » est en

cours d'instruction. La demande d'autorisation du SE fluvial « rive droite » sera déposée à l'automne 2018 et celle du SE fluvio-maritime à l'automne 2019.

Réglementation

L'objectif de la nouvelle réglementation est d'évaluer les niveaux de protection des zones protégées par des systèmes d'endiguement et d'étudier le comportement des systèmes au-delà du niveau de protection. 4 scénarios sont demandés par l'arrêté EDD du 7 avril 2017. Le scénario n°1 correspond à la détermination du niveau de protection du système. Il est demandé de déterminer le niveau du cours d'eau pour lequel le gestionnaire garantit qu'il n'y aura aucune inondation en provenance du système d'endiguement. Ce niveau est déterminé avec une probabilité résiduelle de rupture (comprendre brèche) inférieure ou égale à 5 %. Le scénario n°2 correspond à des ruptures ou à l'absence de fermeture de batardeaux ou de vannes pour le niveau de protection du système d'endiguement. Le scénario n°3 correspond à une défaillance structurelle du système. Il doit être suffisamment représentatif et réaliste pour permettre aux services de secours de préparer la gestion de crise. Pour cela, il est demandé d'avoir une probabilité de brèche, d'au moins un ouvrage, supérieure ou égale à 50 %. Le scénario n°4 correspond au fonctionnement du système pour la crue de référence du PPRi. Si pour cette crue, la probabilité de brèche est inférieure à 5 %, l'inondation de la zone protégée est modélisée sans brèche, en ne prenant en compte que les surverses éventuelles. Si la probabilité de brèche est au contraire supérieure à 5 %, les modélisations sont réalisées avec prise en compte de brèches.

Pour l'ensemble des scénarios, il est demandé la cartographie des venues d'eau dans la zone protégée. Ces venues d'eau sont caractérisées suivant leur dangerosité : peu dangereuses, dangereuses et très dangereuses. Conformément à l'arrêté précité, les zones de venues d'eau non dangereuses correspondent à des hauteurs d'eau inférieures à 1 m et des vitesses d'écoulement inférieures à 0,5 m/s ; et les zones de venues d'eau dangereuses à des hauteurs d'eau supérieures à 1 m ou des vitesses d'écoulement supérieures à 0,5 m/s. Les zones de venues d'eau très dangereuses, citées mais non quantifiées réglementairement, correspondent aux hauteurs d'eau supérieures à 2 m ou vitesses d'écoulement supérieures à 1 m/s.

Le Symadrem a retenu pour l'évaluation des risques liés aux ouvrages, les 4 niveaux suivants :

- le niveau de protection d'un ouvrage correspond au niveau à partir duquel des entrées d'eau dans le système doivent être prises en compte. Ces entrées d'eau peuvent s'effectuer par brèche ou par déversement sur les digues (cas d'une digue résistante à la surverse). Ce niveau est

confondu avec le niveau de sûreté infra, quand le système ne comporte pas de tronçon de digue résistant à la surverse ou quand la probabilité de brèche est supérieure à 5 %, au moment des premiers déversements sur les tronçons normalement prévus à cet effet ;

- le niveau de sûreté d'un ouvrage correspond au niveau à partir duquel des entrées d'eau par brèche doivent être considérées. Ce niveau correspond à une probabilité résiduelle de rupture au plus de 5 %, conformément à l'arrêté précité ;
- le niveau de danger d'un ouvrage correspond à une probabilité de brèche de 50 %. Ce niveau permet de définir le scénario dit n°3, défini dans l'arrêté susvisé pour permettre aux services, en charge des secours aux personnes, de préparer la gestion de crise ;
- le niveau de submersion d'un ouvrage correspond à l'atteinte par le cours d'eau du niveau de la crête de digue.

Pour l'évaluation des risques dans la zone protégée, 2 niveaux ont été définis :

- le niveau de protection des personnes résidant dans une zone protégée correspond au niveau de protection supra défini réglementairement par l'article R.214-119-1 du Code de l'Environnement. Il correspond à la situation « pieds secs » des personnes résidant dans la zone protégée ;
- le niveau de sécurité des personnes résidant dans une zone protégée correspond aux venues d'eau peu dangereuses (1^{er} niveau), dangereuses (2^e niveau) et très dangereuses (3^e niveau) précitées.

Méthodologie générale

La méthodologie mise en œuvre s'est inspirée du modèle Source/Pathway/Receptor et des étapes de l'analyse de risque décrits dans l'International Levee Handbook [2], ainsi que des recommandations de l'USBR [3]. L'analyse a abordé de manière exhaustive les risques en provenance du système d'endiguement mais n'a pas abordé les autres risques auxquels la zone protégée est également exposée (ruissellement pluvial, remontées de nappe et débordements des canaux).

Quatre scénarios d'inondation en provenance du système d'endiguement (Fig. 2) ont été abordés.

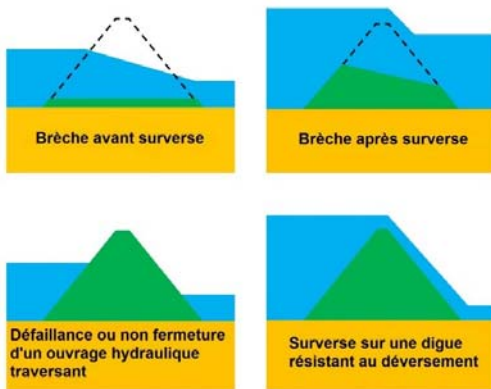


FIGURE 2: SCENARIOS D'INONDATION (D'APRES USBR [3])

Trois concernent les risques incrémentaux induits par la présence même de la digue : la brèche avant surverse ; la brèche après surverse et la défaillance d'organes de fermeture des ouvrages traversants (vannes, batardeaux...). Un scénario traite du risque lié à la surverse sans brèche. C'est la prise en compte de ces quatre scénarios d'inondation et du risque associé, qui va permettre de déterminer et quantifier le risque résiduel d'inondation, auquel la population est exposée.

Pour l'évaluation des risques, le choix a été fait de construire un modèle probabiliste. Ce choix a été motivé par la facilité d'identification et de mise en œuvre du caractère probabiliste de l'aléa crue, du fait des nombreuses observations (données depuis 1816) et des études hydrologiques sur le Rhône. Il a été renforcé par la grande hétérogénéité des faciès géotechniques rencontrés au sein d'un même sondage dans le Delta, à la fois au cœur des ouvrages, due aux différentes étapes de construction des digues et à la superposition de couches de différentes natures les unes sur les autres (effet mille-feuilles) [4] mais également dans leur fondation, compte tenu des multiples changements de tracés que le Rhône a connus dans son histoire [5]. Cette hétérogénéité rend très difficile, voire illusoire le caractère déterministe d'un facteur de sécurité. L'évaluation du risque, lié à chacun des scénarios, est déterminée sous la forme suivante (Fig. 3).

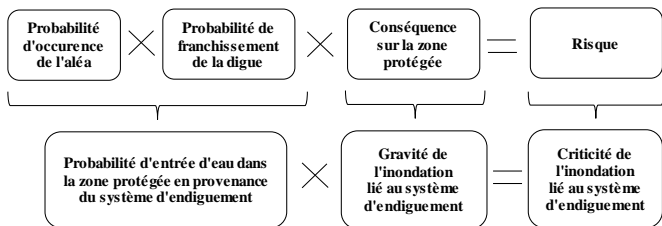


FIGURE 3 : DEFINITION DU RISQUE [6]

L'analyse des risques et notamment de la probabilité d'entrée d'eau dans la zone protégée est basée sur cinq modèles construits à partir d'investigations exhaustives menées dans le cadre d'un diagnostic approfondi : un modèle hydraulique et un modèle morpho-dynamique pour la quantification de la probabilité d'occurrence de l'aléa et trois modèles

respectivement géométrique, géotechnique et fonctionnel pour l'évaluation de la probabilité de résistance et de franchissement de la digue. Les probabilités ont été calculées tous les 125 m de digue (mais évaluées de manière continue notamment pour les modèles hydraulique et géométrique), ce qui correspond à l'extension maximale des brèches observées lors des crues récentes.

Des seuils d'acceptabilité du risque ont été définis en fonction des victimes potentielles suivants les standards internationaux habituellement utilisés (modèle ALARP comme « as low as reasonably practicable » d'après USBR [3]) : 10^{-4} pour la probabilité annuelle de brèche dans les digues du Rhône, portes d'écluse et batardeaux et 10^{-3} pour la probabilité annuelle de défaillance des organes de fermeture des ouvrages hydrauliques traversants et de brèches dans les digues de canaux. La validation de l'analyse de risques est qualifiée sur les résultats de l'étude accidentologique présentée dans [6].

Probabilités conditionnelles et annuelles de brèches

L'analyse de risques a suivi plusieurs étapes décrites ci-après. Les modes de rupture pris en compte ont été définis pour l'érosion interne, à partir du bulletin n°164 de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB/ICOLD) [7] et pour les autres modes de rupture, des recommandations de 2015 du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) concernant la stabilité mécanique des digues en remblai [8]. Les modes de rupture étudiés ont été caractérisés à partir des modèles, formules et abaques cités dans le tableau 1.

TABLEAU 1: MODELES DE CARACTERISATION DES MODES DE RUPTURE

Mécanismes et modes de rupture		Modèle, formulations, abaques utilisés	Réf.
Erosion interne	Erosion de conduit	Bonelli S. & al.	[7] [9]
	Erosion régressive	Sellmeijer J.B. & al.	[7] [9]
	Erosion de contact	Abaque Beguin R.	[7]
	Suffusion	Wan & Fell d'après Burenkova	[7]
Erosion externe	Surverse	Abaque Ciria	[2]
	Affouillement	Abaque Lachat et Isbach	[11] [10]
	Batillage	Abaque Ciria	[2]
Cisaillement	Glissement	Fellenius, Bishop	[8]
	Soulèvement pied aval	USBR	[2] [7]
	Claquage hydraulique	Fry & al. (Erinoh)	[12]

Le retour d'expérience accidentologique [6] et la caractérisation des modes de rupture ont conduit à déterminer *in fine* : onze scénarios de brèche dans les digues en remblai, impliquant un ou deux modes de rupture ; deux scénarios de brèche par rupture mécanique (hors glissement) globalisés pour les ouvrages poids ou de soutènement. Les scénarios sont décrits dans le tableau 2. Le scénario de défaillance fonctionnelle correspondant à la rupture d'une vanne a également été évalué. La rupture d'un batardeau a, quant à elle, été intégrée dans le scénario 13 relatif à la rupture des parapets présents en crête de digue ou sur les quais.

Deux scénarios ont également été analysés et écartés du fait de leur très faible probabilité : la brèche par liquéfaction sous sollicitation sismique du fait de la très faible occurrence de la concomitance d'une crue et d'un séisme et la brèche par érosion liée au batillage provoqué par les vagues, intégrée, pour la partie franchissement, dans le scénario de surverse.

TABLEAU 2 : SCENARIOS DE BRECHE

N°	Description succincte du scénario de brèche
1	Claquage hydraulique d'un terrier de blaireau partiellement colmaté et érosion de conduit
2	Erosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage hydraulique traversant
3	Erosion de conduit dans une racine d'arbre mort
4	Erosion de conduit dans une fissure traversante
5	Claquage hydraulique d'une couche de sol cohésive surplombant une couche de sable et érosion régressive de cette dernière
6	Perte d'étanchéité du masque étanche amont, claquage aval et érosion de contact le long d'une couche de graviers
7	Perte d'étanchéité du masque étanche amont, claquage aval et suffusion d'une couche de grave englobée
8	Surverse sur la digue
9	Affouillement en pied amont de la digue
10	Glissement du talus aval en crue
11	Glissement du talus amont en décrue
12	Stabilité mécanique des digues hors glissement, claquage hydraulique et soulèvement du pied aval
13	Stabilité mécanique des parapets et batardeaux

Le modèle fonctionnel, dont l'objectif a été de recenser et analyser l'ensemble des composants de la digue, a été construit sur la base de 9 fonctions ou barrières de sécurité (8 barrières passives et 1 barrière active) décrites succinctement dans le Tableau 3.

Chaque scénario de brèche a été décrit par un arbre

d'événements à deux branches post « non détection », dont un exemple (scénario 1 du tableau 2) est reproduit en page suivante (Fig. 4). Sont également indiquées les fonctions (Tableau 3) impliquées dans chacune des étapes du scénario.

La probabilité de chaque étape du scénario est déterminée, soit par des probabilités fréquentielles, soit par des probabilités subjectives quand le recours à des probabilités fréquentielles n'est pas possible.

La figure 5 extraite de [4] illustre la probabilité fréquentielle de non dépassement des contraintes critiques des matériaux constituant respectivement les digues d'origine du XIX^{ème} siècle (A1+A2) et les masques étanches de certaines digues récemment sécurisées (A2). Ces lois de probabilité ont été définies à partir d'un panel représentatif de mesures HET sur des échantillons intacts prélevés au sein des digues.

TABLEAU 3 : FONCTIONS ET COMPOSANTS

Fonction	Rôle	Exemples de composants
Étanchéité	Aptitude à éviter les infiltrations et fuites	Limons comp. Perrés, Palplanches
Résistance	Aptitude en cas d'infiltrations ou de fuites à résister à l'érosion	Argile, sable grossier
Protection	Protection contre les animaux fouisseurs Erosion du fleuve, des vagues	Grillage Ripisylve, blocs
Filtration	Aptitude, en cas de défaillance de l'étanchéité, à retenir les matériaux	Géotextile non tissé
Drainage	Aptitude à capter et évacuer les fuites et limiter la montée en pression	Graviers Géo-drains
Stabilité	Aptitude à assurer l'équilibre de l'ouvrage	Fruit talus Recharge aval
Évacuation	Aptitude à résister à la surverse en cas de dépassement du niveau de protection	Enrochements bétonnés Perrés
Environ.	Intégration des ouvrages Déconnexion fleuve/digue	Franc-bord Ripisylve
Sécurité (active)	Surveillance et interventions en toutes circonstances	Surveillance Entreprises mobilisées

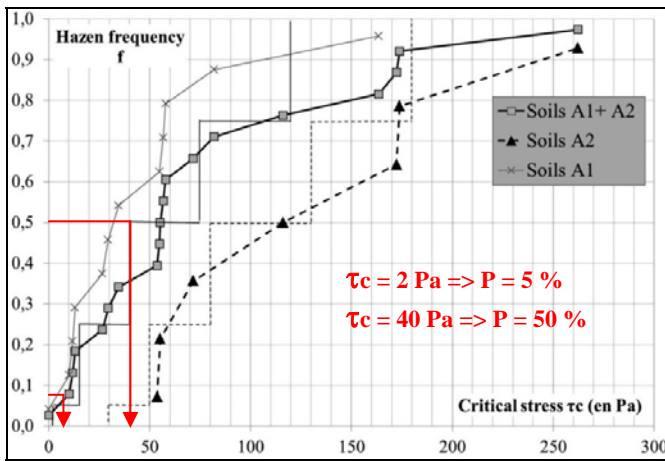


FIGURE 5 : PROBABILITE DE NON DEPASSEMENT DES CONTRAINTES CRITIQUES DES MATERIAUX CONSTITUANT LES DIGUES D'ORIGINE DU SYMADREM [4]

Le tableau 4 donne quant à lui les qualifications verbales et les probabilités conditionnelles associées retenues pour la détermination des probabilités subjectives. Ces dernières extraites des recommandations de l'USBR [3] sont inspirées du travail réalisé par Vick (2002) sur la théorie des croyances. Conformément aux recommandations de l'USBR, la valeur de 0,001 n'a été utilisée qu'exceptionnellement.

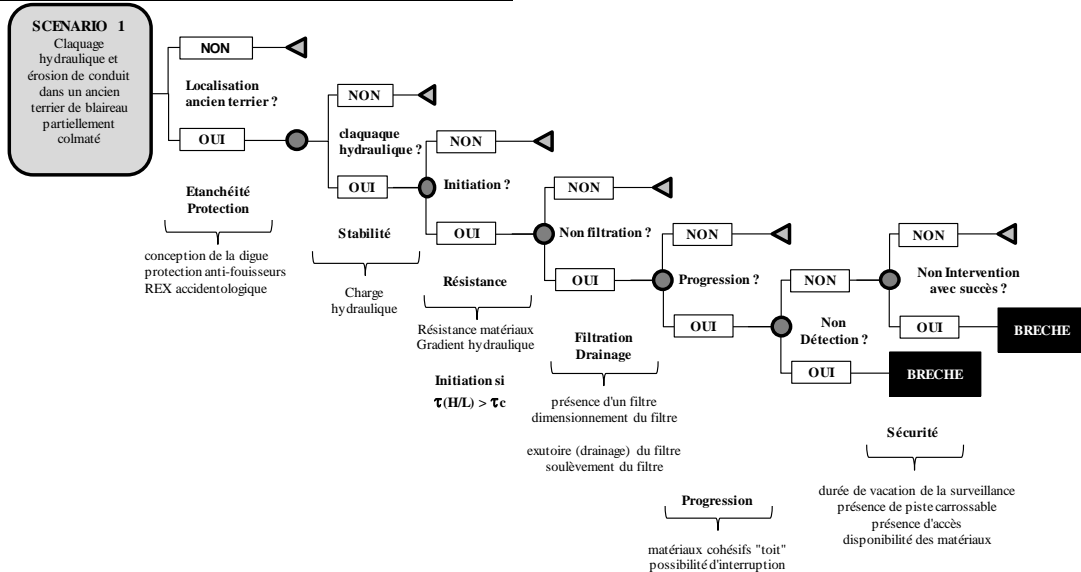


FIGURE 4 : ARBRE D'EVENEMENTS POUR LE SCENARIO DE BRECHE RELATIF AU CLAQUAGE HYDRAULIQUE D'UN TERRIER DE BLAIREAU PARTIELLEMENT COLMATE SUIVI D'UNE EROSION DE CONDUIT [6]

La probabilité conditionnelle du scénario de brèche illustré est exprimée, pour une crue donnée, sous la forme suivante (Eq. (1))

$$P_{\text{brèche}} = P_{\text{localisation}} \cdot P_{\text{claquage}} \cdot P_{\text{initiation}} \cdot P_{\text{non filtration}} \cdot P_{\text{progression}} [P_{\text{non détection}} + (1 - P_{\text{non détection}}) \cdot P_{\text{non intervention}}] \quad (1)$$

TABEAU 4 : QUALIFICATION VERBALE ET PROBABILITE CONDITIONNELLE (D'APRES [3])

Qualification verbale de l'événement	Probabilité conditionnelle associée
Quasiment impossible	0,001
Très peu probable	0,01
Peu probable	0,1
Neutre	0,5
Probable	0,9
Très probable	0,99
Quasiment certain	1

Pour de plus amples détails, on se reportera à MALLETT T. & al. 2014 [4], qui traite de la probabilité de

brèche par érosion de conduit dans les digues en remblai et à MALLETT T. & FRY J.J. 2016 [5], qui traite de la probabilité de brèche par érosion régressive

La figure 6 ci-après illustre pour un profil géométrique (espacé tous les 125 mètres) et une conception, donnés (digue ancienne sans composant particulier dans l'exemple), l'évolution de la probabilité conditionnelle respectivement de chacune des étapes et du scénario de brèche résultant, en fonction de l'intensité de la crue, exprimée en période de retour. Pour ce scénario, les probabilités retenues pour la localisation ($P = 0,5$) et la non filtration ($P = 1$) sont fixes et ont été déterminées à dire d'experts (Tableau 4). La probabilité d'initiation a été estimée en croisant la

distribution fréquentielle de la contrainte critique du matériau et la contrainte de cisaillement exercée dans le conduit [4]. Les probabilités de non détection et de non intervention ont été déterminées en croisant le temps de rupture entre la détection et la brèche, le pas de temps de surveillance en crue et le temps d'intervention (vérifiés tous deux en novembre 2016 lors d'une crue décennale). La probabilité de progression, estimée initialement à 1 dans [4] et [5], a été revue depuis, compte tenu du retour d'expérience accidentologique, qui a montré que dans certaines conditions (revanche importante/faible charge), le toit de la digue en s'effondrant avait permis l'interruption du mécanisme de brèche.

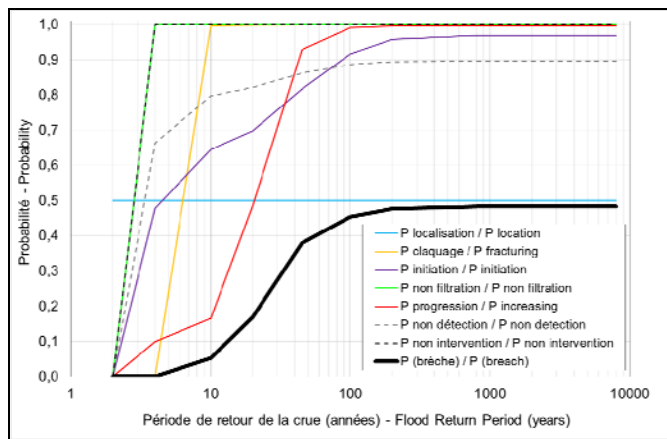


FIGURE 6 : PROBABILITES CONDITIONNELLES (ETAPES ET SCENARIO) SUIVANT L'INTENSITE DE LA CRUE [6]

La probabilité globale de brèche P_c , intégrant les treize scénarios précités (Tableau 2), est définie pour une crue donnée par l'équation de Morgan (Eq. (2)) (P_i est la probabilité conditionnelle de brèche du scénario i) :

$$P_c = 1 - \prod_{i=1}^{13} (1 - P_i) \tag{2}$$

La figure 7 illustre pour un profil géométrique et une conception, donnés, les probabilités conditionnelles de chacun des scénarios (dont certains sont proches de 0) et la probabilité globale de brèche intégrant les treize scénarios, suivant l'intensité de la crue.

Dans l'exemple présenté, le scénario de brèche par érosion de conduit dans un terrier de blaireau est le principal scénario de brèche suivi de la surverse et de l'érosion de conduit dans des fissures et racines d'arbres morts.

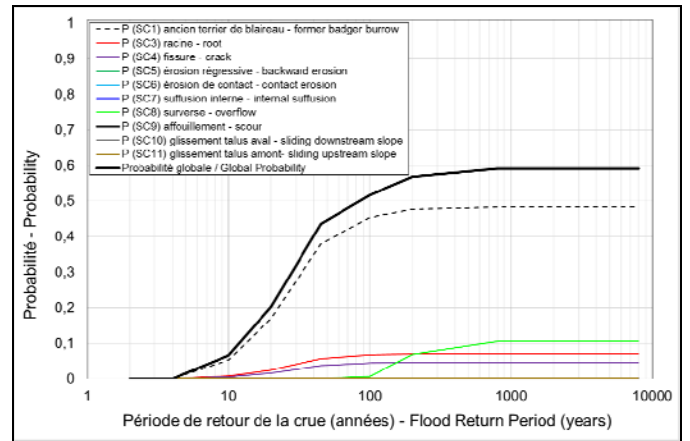


FIGURE 7 : PROBABILITES CONDITIONNELLES (SCENARIOS ET GLOBALE) SUIVANT L'INTENSITE DE LA CRUE [6]

Les calculs ont été menés pour 9 crues caractéristiques (Tableau 5) couvrant des périodes de retour de 2 ans à 8 000 ans, permettant de décrire exhaustivement le comportement du système à la fois pour les digues anciennes (Fig. 8), dont la probabilité de brèche augmente significativement pour de faibles occurrences (10 à 50 ans) et pour les digues sécurisées dans le cadre du Plan Rhône (Fig. 8), pour lesquels la probabilité de brèche demeure très faible jusqu'à la crue de sûreté ($T= 800$ à $1\ 000$ ans).

Pour chaque scénario de crue considéré, une probabilité d'occurrence, par coupure sur l'ensemble des périodes de retour, a été attribuée. La probabilité d'occurrence correspondant à une coupure entre les temps T_1 et T_2 est égale à $p = 1/T_1 - 1/T_2$. Les périodes T_1 et T_2 , encadrant la crue retenue pour la coupure, correspondent à des variations de débits d'environ $\pm 5\%$, qui est également la fourchette de précision donnée pour les débits en tête du Delta. Ces coupures permettent d'avoir une représentation exhaustive et sans effet de palier du fonctionnement hydraulique des ouvrages.

TABLEAU 5 : DEBIT A BEUCAIRE/TARASCON, PERIODE DE RETOUR ET PROBABILITE D'OCCURRENCE DES CRUES

Q (m ³ /s)	T (ans)	T ₁ (ans)	T ₂ (ans)	Probabilité annuelle d'occurrence
6 000	2		2	0,5
7 200	4	2	7,8	0,372
8 500	10	7,8	15,6	0,064
9 500	20	15,6	31,3	0,032
10 500	50	31,3	62,5	0,016
11 500	100	62,5	125	0,008
12 500	200	125	500	0,006
14 160	800	500	2000	0,0015
17 000	8000	2000		0,0005

Pour les crues de période de retour 2 ans, une probabilité conditionnelle de brèche de 0 a été retenue, compte tenu de l'absence de sollicitation des digues.

Pour les ouvrages renforcés dans le cadre du Plan Rhône [1], le comportement du système a été également modélisé pour des crues extrêmes supérieures à la crue de sûreté. Pour cette gamme d'événements, les digues résistantes à la surverse, prévues entre Beaucaire et Arles [1], ont pour effet d'écrêter les crues du Rhône et de plafonner les lignes d'eau en aval. En amont des zones de déversement, l'effet de remous n'est plus perceptible dès le premier kilomètre. Les premiers déversements sur les digues « millénales » apparaissent au droit des digues urbaines de Beaucaire et de Tarascon pour des crues de périodes de retour comprises entre 2500 et 3000 ans. La conception des ouvrages en amont des déversements (perrés, petits blocs, palplanches) leur permet néanmoins de résister à une lame d'eau estimée à 15 cm, ce qui correspond à une crue de période de retour 8000 ans. Nous avons retenu prudemment pour ces tronçons amont une probabilité conditionnelle de brèche de 10 % pour la dernière coupure. En aval, le comportement des ouvrages pour les crues extrêmes suit le comportement des ouvrages pour la crue de sûreté.

Au final, la probabilité annuelle de brèche est calculée par la somme, pour chaque coupure de crue, du produit de la probabilité d'occurrence de la coupure (Tableau 5) par la probabilité conditionnelle globale de brèche correspondante à la coupure (Tableau 6).

Pour chaque tronçon homogène, les résultats ont été exprimés sous plusieurs formes permettant une analyse approfondie ; cette dernière étant effectuée sur le profil le plus défavorable.

Le Tableau 6 ci-dessous est une illustration d'un des rendus opérés. La probabilité annuelle de brèche pour ce tronçon (digue d'origine) est de 1.10^{-2} .

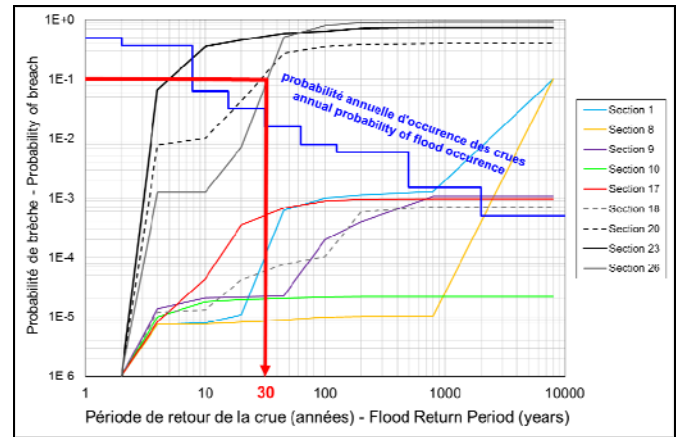


FIGURE 8 : PROBABILITE CONDITIONNELLE DE BRECHE PAR TRONÇON EN FONCTION DE L'INTENSITE DE CRUE [6]

Niveaux de protection, de sûreté et de danger des ouvrages

Les probabilités de brèches ayant été déterminées à l'échelle des ouvrages constituant le système d'endiguement, il s'agit maintenant de déterminer les niveaux de protection et de sûreté des ouvrages ; étape préalable à la détermination des niveaux de protection de la zone protégée. Les niveaux de danger et de submersion sont quant à eux définis dans une seconde étape pour permettre de déterminer le scénario dit n°3 de l'étude de dangers.

Les figures 9, 10 et 11, en page suivantes, donnent respectivement les niveaux de sûreté, de danger et de submersion, au 1^{er} juillet 2018, de chaque tronçon homogène du système d'endiguement fluvial de la Camargue Insulaire. On constate que le niveau de danger est sensiblement inférieur au niveau de submersion (crête de digue), ce qui est conforme au retour d'expérience des crues récentes.

TABLEAU 6 : PROBABILITES CONDITIONNELLES DE BRECHE POUR UN TRONÇON DONNE

T (ans)	Probabilité conditionnelle de brèche maximum par crue (période de retour T) et par scénario											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Globale
4	4E-03	0E+00	4E-03	4E-04	1E-08	2E-07	0E+00	1E-06	1E-12	7E-03	6E-03	8E-03
10	5E-03	2E-06	6E-03	5E-04	1E-08	3E-07	0E+00	1E-06	1E-12	7E-03	6E-03	1E-02
20	3E-02	5E-06	2E-02	3E-03	3E-08	2E-05	2E-08	1E-06	1E-12	7E-03	8E-03	4E-02
50	6E-02	2E-01	8E-02	6E-03	8E-08	4E-04	2E-04	1E-06	1E-12	7E-03	1E-02	3E-01
100	8E-02	2E-01	1E-01	8E-03	1E-07	1E-03	4E-03	2E-06	1E-12	7E-03	2E-02	4E-01
200	9E-02	2E-01	1E-01	9E-03	1E-07	1E-03	6E-03	5E-03	1E-12	7E-03	2E-02	4E-01
800	1E-01	2E-01	1E-01	1E-02	2E-07	1E-03	7E-03	3E-02	1E-12	7E-03	3E-02	4E-01

La figure n°8 illustre pour différents tronçons homogènes de digue, l'évolution de la probabilité maximale de brèche par tronçons en fonction de l'intensité de la crue. Les tronçons (ou sections) 1 à 18 correspondent à des digues sécurisées dans le cadre du Plan Rhône [1] et les tronçons 20 à 26, des digues du XIX^{ème} siècle, non sécurisées depuis leur création (la section 26 a une probabilité de brèche de 10 % pour la crue trentennale).

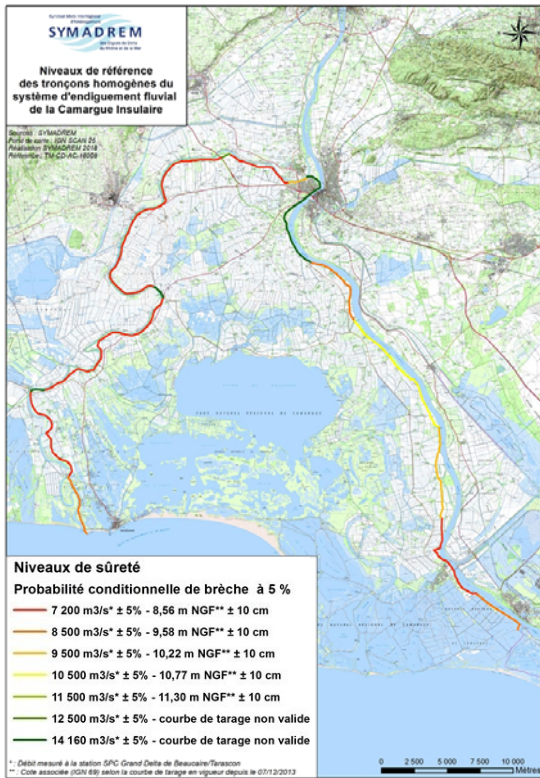


FIGURE 9 : NIVEAU DE SURETE DES OUVRAGES EN FONCTION DU DEBIT OU DE LA COTE A BEUCAIRE/TARASCON

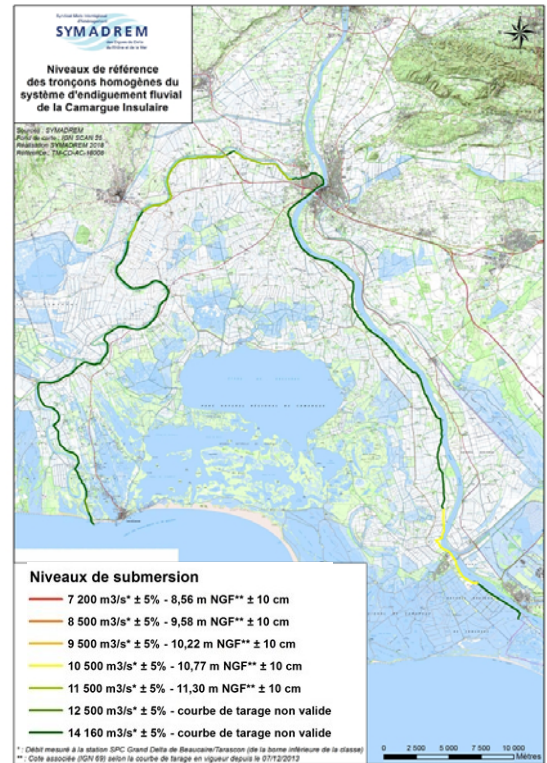


FIGURE 11 : NIVEAU DE SUBMERSION DES OUVRAGES EN FONCTION DU DEBIT OU DE LA COTE A BEUCAIRE/TARASCON

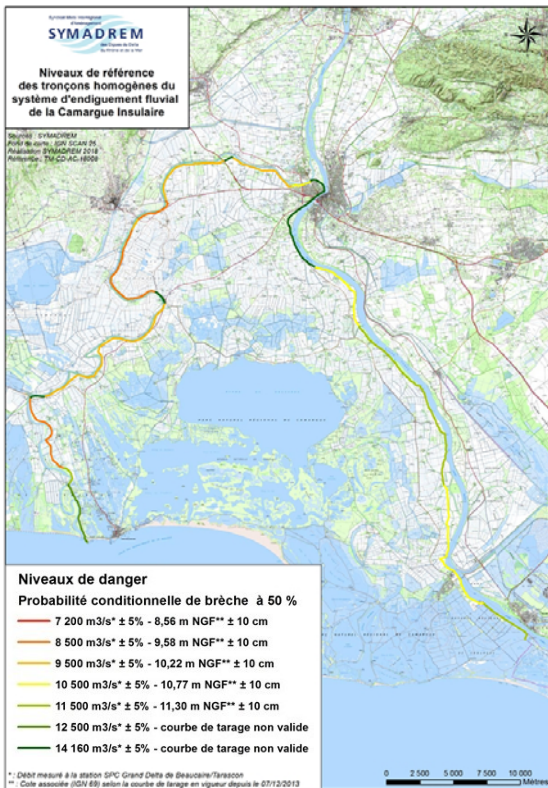


FIGURE 10 : NIVEAU DE DANGER DES OUVRAGES EN FONCTION DU DEBIT OU DE LA COTE A BEUCAIRE/TARASCON

Niveaux de protection de la zone protégée

Pour la détermination des niveaux de protection au sein de la zone protégée par le système, un découpage en sous-zones protégées cohérentes sur le plan hydraulique et topographique a été opéré. Des scénarios d'inondation par brèche ont été modélisés à divers endroits du système pour différentes intensités de crue dépassant le niveau de sûreté des ouvrages, ce qui a permis in fine d'attribuer par sous-zone protégée, un niveau de protection « garanti pieds secs » avec une probabilité résiduelle de brèche inférieure ou égale à 5 %.

La figure 12 donne les niveaux de protection dans la zone protégée par le système d'endiguement fluvial « Camargue Insulaire ». Ces derniers vont de 5 ans à 1000 ans. Cette variation s'explique par le fait que certains secteurs avec une topographie avantageuse se trouvent derrière des digues sécurisées jusqu'à la crue millénale et à l'abri des inondations par brèches dans les digues non sécurisées. A contrario, le niveau de protection des bandes de sécurité des digues non sécurisées ne peut être garanti à 95 % fiable pour des crues supérieure ou égales à 5 ans.

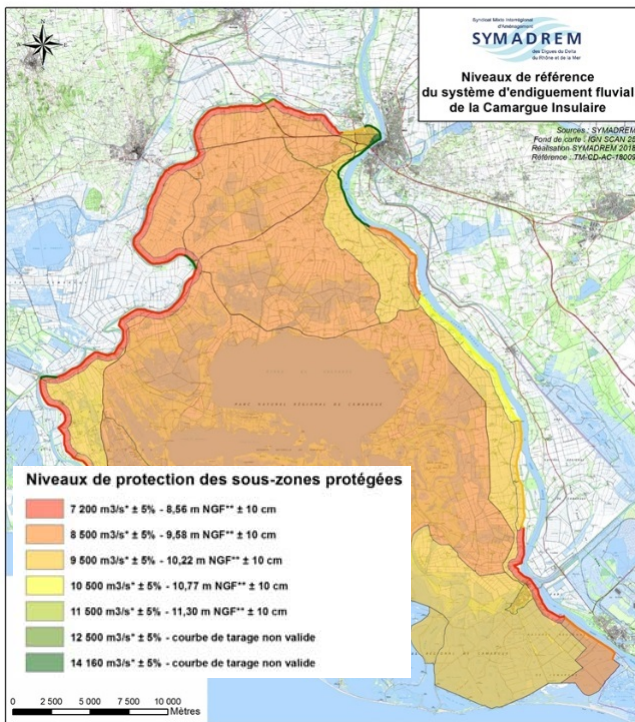


FIGURE 12 : NIVEAUX DE PROTECTION DE LA ZONE PROTEGEE CAMARGUE INSULAIRE EN FONCTION DU DEBIT OU DE LA COTE A BEAUCAIRE/TARASCON

Pour les systèmes d'endiguement dont la sécurisation est en cours (rives droite et gauche) et qui comportent des digues résistantes à la surverse, des scénarios d'inondation par surverse sans brèche ont été modélisés sur les parties du système sécurisé et des scénarios d'inondation par brèche avant surverse ont été combinés pour la détermination des niveaux de protection au sein de la zone protégée [6].

Comportement du système au-delà du niveau de protection

De manière à permettre aux autorités compétentes en matière de secours de disposer de scénarios réalistes et porteurs d'enseignement, une quarantaine de scénarios d'inondation probables à 50 % ou plus (scénario n°3 de l'arrêté EDD) ont été modélisés et interprétés de manière à établir des cartes simples d'utilisation par les autorités compétentes (Figure 13) avec en fonction du débit du Rhône en tête de Delta :

- les zones à pieds secs (sans couleur),
- les venues d'eau peu dangereuses (couleur verte),
- les venues d'eau dangereuses (couleur orange),
- les venues d'eau très dangereuses (couleur rouge).

La cartographie relative au système d'endiguement fluvial de la Camargue Insulaire figure ci-après.

Un travail de coordination entre les différents acteurs (mairie, service d'incendie et de secours) a débuté et il semblerait que la mise en sécurité préventive des populations (au sens d'évacuation massive) soit sur le plan opérationnel très difficile, voire inenvisageable. Les services de secours s'orienteraient plutôt vers un pré-positionnement de véhicules de secours leur permettant d'intervenir très rapidement en cas d'amorce de brèche. En accord avec ces derniers, il a été décidé de produire en sus des obligations réglementaires des cartes de propagation des crues à 1h, 3h, 6h, 9h et 12h en retenant une échelle de hauteurs adaptée à la circulation des engins de secours [6].

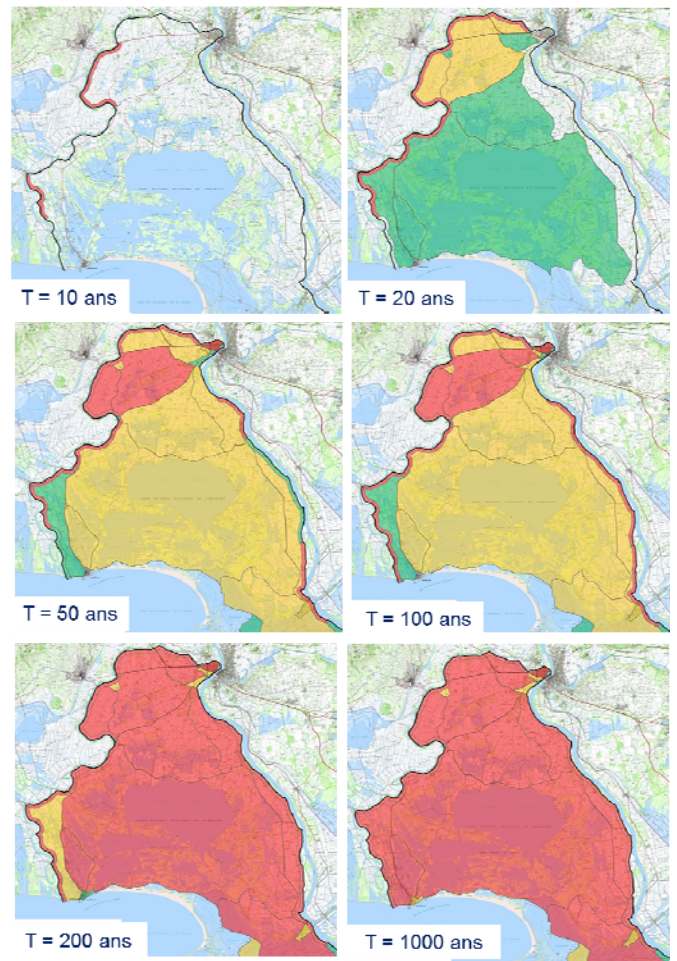


FIGURE 13 : SCENARIOS D'INONDATION PROBABLES A 50 % OU PLUS ET DANGEROSITE LIEE A L'INONDATION

Conclusion

Les premiers enseignements de l'étude montrent que le modèle probabiliste mis en œuvre donne des résultats conformes à l'observation et au retour d'expérience. L'écart, entre le seuil de probabilité résiduelle de brèche de 5 % permettant de définir les niveaux de protection (et de sûreté) et la mise en œuvre opérationnelle de l'évacuation massive de population (décision certaine), qui peut transférer le risque de décès par inondation par un risque de décès sur la route, mérite d'être analysé en profondeur, d'autant plus que le retour d'expérience des crues passées dans le delta tend à montrer que le nombre de décès a toujours été faible malgré l'ampleur des inondations (0 à 5 par inondation depuis 1840). La difficulté d'évacuer massivement des populations pour des occurrences fréquentes justifie a posteriori la nécessité de sécuriser l'ensemble du système pour arriver à une probabilité annuelle de brèche inférieure à 10^{-4} sur l'ensemble du système, qui correspond au seuil d'acceptabilité retenue par le SYMADREM.

Références

- [1] SYMADREM (2012). *Plan Rhône volet inondations - Programme de sécurisation des ouvrages de protection contre les crues du Rhône du Barrage de Vallabrègues à la Mer*. Délibération du comité syndical du Symadrem n°2012- du
- [2] USACE/MEDDE/CIRIA (2013). *The International Levee Handbook* - <http://www.leveehandbook.net>.
- [3] USBR (2015). *Best Practices and Risk Methodology* - <http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/methodology.html>.
- [4] MALLET T., OUTALMIT K. & FRY JJ. (2014). *Probability of failure of an embankment by internal erosion using the Hole Erosion Test*. ICOLD BALI International Symposium.
- [5] MALLET T., FRY J.J. (2016). *Probability of failure of an embankment by backward erosion using the formulas of Sellmeijer and Hoffmans* – ICOLD Johannesburg International Symposium.
- [6] MALLET T., DAST C. REQUI M. CHARDES C. CASTAGNET A. et J.J. FRY (2018). *Etude de dangers du système d'endiguement rive gauche du delta du Rhône* – ICOLD Vienna Congress.
- [7] ICOLD (2015). *Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations – bulletin n°164 – Volume 1: internal erosion processes and engineering assessment*.
- [8] CFBR (2015). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai – recommandations définitives*.
- [9] BONELLI S. & al. (2013) – *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees* – Editions Wiley-ISTE.
- [10] DEGOUTTE G. & al. (2012). *Les déversoirs sur les digues fluviales* – éditions quae.
- [11] LACHAT B. (1994 réédité 1999). *Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales* – Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire.
- [12] Fry J.J. & al (2015). *Analyse et traitement de l'érosion interne – procédés classiques et nouveaux* – ICOLD Stavanger Congress.