



HAL
open science

Accidentologie des digues du delta du Rhône de 1840 à nos jours

T. Mallet, J.J Fry, R. Tourment, P. Mériaux

► **To cite this version:**

T. Mallet, J.J Fry, R. Tourment, P. Mériaux. Accidentologie des digues du delta du Rhône de 1840 à nos jours. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les inondations - 3e colloque - Dignes 2019, Mar 2019, Aix-en-Provence, France. pp.10. hal-02609432

HAL Id: hal-02609432

<https://hal.inrae.fr/hal-02609432>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Accidentologie des digues du delta du Rhône de 1840 à nos jours

Accidentology of the levees of the Rhône delta from 1840 to the present day

T. Mallet¹, J.J. Fry², R. Tourment³, P. Mériaux³

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

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

³Irstea, Aix-en-provence, remy.tourment@irstea.fr

Résumé

Les digues du Delta du Rhône ont été sensiblement rehaussées après les grandes crues de 1840 et 1856 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 avec des dames de 15 kg) et de leur composition très hétérogène (alternance limons/sables) due aux phases successives de construction (effet mille-feuille), ces digues sont très exposées au risque de brèches en crues.

Dans le cadre des études de dangers (EDD) exigées par la réglementation française, une étude accidentologique a été menée sur l'ensemble du parc de digues fluviales géré par le SYMADREM (210 km de digues fluviales). Le présent article en présente les principaux résultats en distinguant :

- la période récente s'étalant de 1993 à nos jours,
- la période plus ancienne s'étendant de 1840 à 1886.

La période intermédiaire 1886-1993 qui correspond à la veille hydrologique du Rhône n'a pas été étudiée, du fait de l'absence d'archives pour cette période.

Dans une première partie, il est proposé une classification des incidents et des accidents en trois catégories : les brèches, les départs de brèche et les désordres, pour lesquels une définition est préalablement donnée.

La deuxième partie présente pour chacune des catégories, un bilan et des statistiques par mode initiateur de rupture (érosion interne, surverse, affouillement du pied amont et glissement) et les enseignements retenus pour l'analyse de risque. La troisième partie dresse un bilan des caractéristiques géométriques des brèches et de leurs conséquences sur la zone protégée. La conclusion de l'article rappelle l'étape incontournable que constitue l'étude accidentologique dans l'analyse de risques, pour la détermination des scénarios de brèches, le calage des méthodes probabilistes d'évaluation des risques et la détermination des scénarios d'inondation.

Mots-Clés

accidentologie, étude de dangers, brèche, rupture, retour d'expérience.

Abstract

Levees of the Rhone Delta were significantly raised after the great floods of 1840 and 1856 in place of other works even older, some dating back to the 12th century. Given their form of construction (compaction with manual tamping devices of 15 kg) and their heterogeneous composition (alternating silt/sand) due to successive stages of building, levees are very susceptible to breaching during floods.

As part of the hazard studies required by French regulations, an inquiry on incidents was carried out on the whole levees system managed by SYMADREM (210 km of river levees). This paper presents the main results by distinguishing:

- the recent period from 1993 up to today,
- the older period extending from 1840 to 1886.

The intermediate period 1886-1993 corresponding to the hydrological watch of the Rhone has not been studied because of the lack of archives for this period.

In the first part, a classification of incidents and accidents is proposed in three categories: breaches, breaches in progress and disorders, for which a definition has been given.

The second part presents, for each category, a report and statistics by initiating failure mode (internal erosion, overflowing, scour and sliding) and the lessons learned for the risk assessment. The third part reviews the geometrical characteristics of the breaches and their consequences on the protected area. The conclusion of the paper recalls the essential step of the inquiry on past incidents in the risk assessment, for the determination of the possible accident scenarios, the calibration of probabilistic risk assessment methods and the determination of the inundation scenarios.

Key Words

accidentology, risk analysis, breach, failure, feedback.

Introduction

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 maritime constitués respectivement de 225 km de digues fluviales et 50 km de digues maritimes. Ces systèmes sont traversés par environ 30 passages batardables et 350 ouvrages hydrauliques manœuvrables en crues ainsi que 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 Dignes 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. 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.



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

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.

Dans le cadre des études de dangers qu'il réalise, le Symadrem a effectué une étude accidentologique des digues fluviales de 1840 à nos jours, à partir des archives départementales du Vaucluse, des Bouches-du-Rhône, du

Gard et de l'Hérault, de ses archives propres et des rapports post-crue établis par l'Irstea (anciennement Cemagref) de 1993 à 2003. L'objet de l'article est de présenter les principaux résultats et l'utilisation qui en a été faite lors des études de dangers.

Définitions et données

L'analyse a été menée sur 15 crues couvrant la période 1840 – 2016 en distinguant trois types d'accidents et d'incidents : les brèches, les départs de brèche et les désordres.

La **brèche** est une rupture au sens de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) dont le lâcher d'eau ne peut plus être maîtrisé. La brèche est obtenue à la fin d'un processus impliquant des mécanismes de dégradation et de ruptures, qui se développe en trois étapes [1] : initiation, formation et élargissement. Elle est donc caractérisée par une phase d'élargissement et des entrées d'eau dans la zone protégée qui ne peuvent plus être interrompues.



PHOTO 1 : EXEMPLE DE BRECHE (© PHOTO-AERIENNE-FRANCE.FR)

Le **départ de brèche** se distingue de la brèche par le fait que la phase d'élargissement n'est pas encore en cours et/ou que le lâcher d'eau a été maîtrisé ou sans impact sur la zone protégée. Il peut y avoir des entrées d'eau, sans conséquence sur l'aval, qui peuvent être interrompues par un effondrement de la digue, une intervention d'urgence ou la diminution de la charge hydraulique liée à la décrue.



PHOTO 2 : EXEMPLE DE DEPART DE BRECHE (© BRLI)

Le **désordre** est défini quant à lui comme le signe observable ou quantifiable d'une dégradation de l'état initial de la digue qui peut être l'amorce d'une rupture et d'un processus de brèche.



PHOTO 3 : EXEMPLE DE DESORDRE (© SYMADREM)

Ces choix de définition ont eu pour conséquences de requalifier, dans le cadre de l'analyse, certaines brèches de 1993 et 1994 [2] en départ de brèche ou en désordre.

Trois périodes ont été distinguées : la période ancienne (A) de 1840 à 1886, la période récente de 1993 à nos jours (R) et la période globale (G) résultante de la somme des deux. On notera que la période allant de 1886 à 1993, correspondant à la « veille » hydrologique du Rhône, n'a pas été analysée en termes de désordres faute de documents d'archive suffisamment détaillés pour procéder à une analyse. Le bilan des brèches, départs de brèche et désordres par crue analysée figure dans le tableau n°1.

TABLEAU 1 : BRECHES, DEPARTS DE BRECHE ET DESORDRES PAR CRUE ANALYSEE

		Crue	Brèche	Départ de brèche	Désordre
Période G	Période A	Nov. 1840	18 + 3	4	NC
		Nov. 1841	8	2	NC
		Nov. 1843	10	17	NC
		Oct. 1846	0	2	NC
		Mai 1856	9	14	NC
		Oct. 1872	0	1	NC
		Nov. 1886	0	NC	NC
	Période R	Oct. 1993	4	10	NC
		Jan. 1994	2	2	8
		Nov. 1994	0	0	1
		Nov. 1996	0	1	4
		Sept. 2002	0	1	5
		Nov. 2002	1	1	32
Déc. 2003	2 + 2	2	68		
Nov. 2016	1	0	15		

NC : non connu

Sur les 15 crues analysées, 57 brèches, 57 départs de brèche et 133 désordres ont été recensés. 3 brèches par retour vers le fleuve ont également été recensées en 1840, ce qui donne un nombre total de 117 brèches et départs de brèche en 176 ans. Les deux brèches occasionnées en déc. 2003 sur les digues de protection des trémies du remblai ferroviaire entre Tarascon

et Arles ont également été incluses dans l'analyse.

Sur les 133 désordres relevés par les équipes de surveillance et les gardes digues, 100 désordres concernent les crues de novembre 2002 (T = 20 ans et durée de crue 15 jours) et de décembre 2003 (T = 100 ans et durée de crue de 3 jours) ; toutes deux très bien documentées. Le peu de désordres, relevés pour les crues antérieures, s'explique par une documentation plus succincte et par le caractère non opérationnel de la surveillance des digues (et donc du recensement exhaustif des désordres en crue). De manière à mieux cerner la représentativité des phénomènes, l'analyse des désordres a été limitée à ces deux crues, auxquelles on a ajouté les désordres de la crue de novembre 2016 (T ≈ 10 ans), la plus forte depuis 2003.

Les brèches et départs de brèche sont localisés sur la figure 2. Les brèches sont globalement localisées sur le Rhône et le Petit Rhône amont, là où les hauteurs de digues sont les plus importantes (4,5 à 7 m) et les hauteurs de charge (3 à 6 m) plus élevées par le passé. Les départs de brèche sont quant à eux plutôt localisés sur le Grand Rhône et le Petit Rhône aval, là où les hauteurs de digues (2 à 4,5 m) sont plus faibles et les hauteurs de charge par le passé également moins élevées (1,5 à 2,5 m).

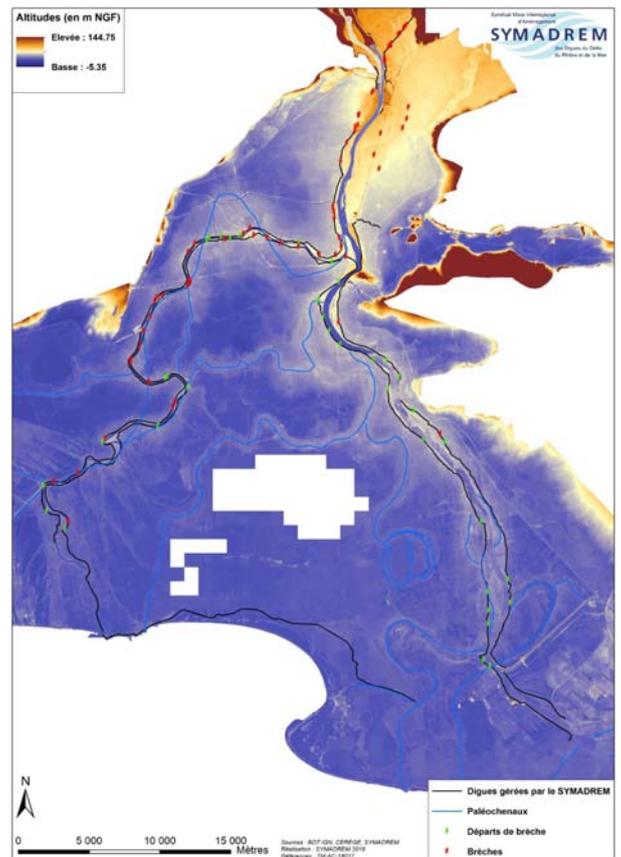


FIGURE 2 : LOCALISATION DES BRECHES, DEPARTS DE BRECHE ET PALEO- CHENAUX DANS LE DELTA DU RHONE

Bilan des incidents et accidents

Statistiques mondiales des barrages en remblai

Le recensement des ruptures dans les barrages en remblai réalisé par la CIGB donne les statistiques suivantes :

TABLEAU 2 : STATISTIQUE DES RUPTURES DE BARRAGES EN REMBLAI ([1] D'APRES FOSTER & AL.)

Mécanisme de rupture	Erosion		Glissement	
	Surverse	Erosion interne	Instabilité statique	Instabilité sismique
Statistiques	48 %	46 %	4 %	2 %
	94 %		6 %	

Statistiques des brèches et départs de brèche

L'étude accidentologique menée sur les digues du delta du Rhône donne une tendance similaire avec 100 % des brèches et des départs de brèche dus à des phénomènes d'érosion répartis comme suit :

TABLEAU 3 : STATISTIQUE DES BRECHES (57) DANS LES DIGUES DU DELTA DU RHONE

Période	Surverse	Erosion interne	Affouillement
1840-1886	36 %	64 %	0 %
1993-2016	25 %	75 %	0 %
1840-2016	33 %	67 %	0 %

TABLEAU 4 : STATISTIQUE DES BRECHES (57) ET DEPARTS DE BRECHE (57) DANS LES DIGUES DU DELTA DU RHONE

Période	Surverse	Erosion interne	Affouillement
1840-1886	19 %	73 %	8 %
1993-2016	17 %	83 %	0 %
1840-2016	18 %	76 %	6 %

Les brèches par surverse sont au nombre de 19 sur toute la période. 16 se sont produites en 1840 avant le rehaussement généralisé des digues et 3 lors de la crue de décembre 2003 (dont 2 hors du périmètre Symadrem). Elles ont toutes été initiées sous une très faible lame d'eau (moins de 10 cm) mais avec une hauteur de chute supérieure à 4 m. Pour ces trois brèches de 2003, des mécanismes d'érosion interne ne sont pas à exclure.

Deux départs de brèche par surverse ont été observés respectivement en 2002 et 2003 sur un linéaire de 2 km en partie aval du delta. Malgré une durée de déversement d'une vingtaine d'heures, la faible lame d'eau (5 cm sur 2 km ; 20 cm localement) conjuguée à la faible hauteur des digues à cet endroit (moins de 2 m), et la présence d'une végétation

dense en pied de digue, ont eu pour conséquence de ralentir les vitesses et l'érosion du talus côté zone protégée.

L'absence de brèche par glissement de talus sous sollicitation hydrostatique ou sismique s'explique, pour le premier cas, par le caractère transitoire des crues, qui compte tenu de la perméabilité des sols en place, n'ont pas le temps de saturer le corps de digue et, pour le deuxième cas, par la très faible probabilité d'occurrence d'un séisme concomitamment avec une crue. Des glissements en crue et en décrue se sont produits, mais sans atteindre la crête et sans engendrer de départ de brèche. Ils ont souvent été causés par l'initiation d'une fuite localisée dans la digue (glissement du talus côté protégé en crue) ou, ont résulté d'un raidissement de talus (émergé et immergé) suite à un affouillement en pied de digue (glissement du talus côté fleuve en décrue).

Pour la période 1993-2016, toutes les brèches par érosion interne sont dues à l'érosion de conduit à l'exception d'une, pour laquelle l'initiateur reste à confirmer.

Pour la période 1840-1886, la dénomination par les ingénieurs de l'époque de « brèche par infiltration » laisse un doute sur la possibilité de cas d'érosion régressive, notamment au droit de paléo-chenaux. Néanmoins, compte tenu du retour d'expérience récent, l'érosion de conduit semble être également pour cette période le mode de rupture privilégié des brèches par érosion interne.

L'étude a également montré que l'affouillement pouvait être une source de désordre, voire de départ de brèche quand la crue était longue (crue de 1856), mais sans conduire jusqu'à la formation de brèche.

La plupart des phénomènes ont été occasionnés sur les secteurs proches du fleuve (largeur du ségonnal ou franc-bord < 20 mètres) ou dans les secteurs, où des paléo-chenaux sont connus ou pressentis.

Le tableau n°5 donne pour la période récente le bilan des brèches et départs de brèche par initiateur de rupture

TABLEAU 5 : PERIODE 1993-2016 BILAN DES BRECHES ET DEPARTS DE BRECHE PAR INITIATEUR DE RUPTURE

Initiateur de la brèche	Brèches		Brèches + Départs	
	Nb	%	Nb	%
Surverse	3	25	5	17
Erosion de conduit par terrier	6	50	17	59
Erosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage traversant	2	17	6	21
Erosion interne - autre	1	8	1	3
Affouillement	0	0	0	0
Glissement talus côté fleuve	0	0	0	0
Glissement talus côté terre	0	0	0	0
Total	12	100	29	100

Enseignements du REX sur les brèches pour les EDD

Les brèches par érosion de conduit dans des terriers d'animaux fouisseurs représentent 50 % du total des brèches. En incluant les départs de brèche, cette proportion passe à 59 %. Les brèches par érosion de conduit dans un vide le long d'un ouvrage traversant représentent 17 % des brèches et 21 % en incluant les départs de brèche.

L'analyse rétrospective des brèches récentes par érosion de conduit a montré que, dans tous les cas, la contrainte critique (caractérisant le seuil d'érosion) des matériaux était inférieure à 10 Pa, voire moins. Les Index d'érosion (caractérisant la cinétique d'érosion) étaient quant à eux de l'ordre de 3 (entre 2,7 et 3,2). A contrario, un cas de grosses fuites dans des terriers de lapins a été constaté et n'a pas donné lieu à brèche quand la contrainte critique était de l'ordre de 50 Pa.

Les gradients initiateurs lors du démarrage du processus de brèche dans les terriers de blaireaux ou de lapins ont tous été compris entre 0,01 et 0,05. Ils ont été légèrement supérieurs à 0,1 pour les brèches par érosion de conduit le long des ouvrages traversants.

L'analyse des charges d'eau mesurées depuis le côté protégé (figure 3) montre que quasiment tous les départs de brèche par érosion interne présentaient une charge d'eau inférieure à 2,5 mètres (à l'exception d'une) et qu'à contrario, toutes les brèches également par érosion interne, avaient au moment du processus final d'ouverture, une charge d'eau supérieure ou égale à 2,5 mètres (à l'exception de celle de 2016).

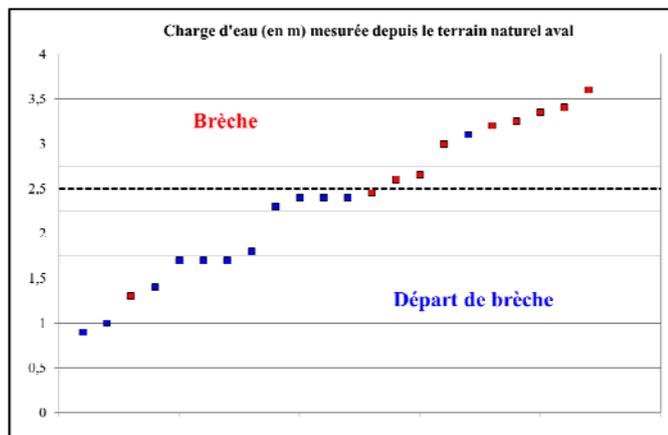


FIGURE 3: CHARGE D'EAU DES BRECHES ET DEPARTS DE BRECHE LIES A L'EROSION INTERNE

L'analyse du paramètre Revanche¹/Hauteur (R/H) de digue a montré également une différence de comportement lors du processus de formation de la brèche par érosion interne. Lorsque ce rapport a été inférieur à 0,4, il y a eu systématiquement formation de brèche et a contrario quand

¹ Défini dans l'article comme étant la différence entre la cote de la crête de digue et la cote du fleuve au démarrage du processus de brèche.

ce rapport a été supérieur à 0,5, le processus de brèche n'est allé quasiment jamais jusqu'à sa fin, ce qui pourrait laisser à penser que l'effondrement du toit, lors du processus d'accroissement du conduit, a pu interrompre le processus de progression de la brèche. Dans tous les cas, les paramètres charge d'eau et le ratio R/H apparaissent fortement corrélés entre eux et jouent un rôle primordial dans le processus de brèche.

Concernant la surverse, l'étude a montré qu'avec une hauteur de chute inférieure à 1,5 m et une végétation dense en pied d'ouvrage permettant de ralentir les vitesses, le processus de brèche par surverse n'était pas allé à son terme avec des lames d'eau inférieures à 20 cm et des durées de déversement de plusieurs dizaines d'heures. A contrario avec des hauteurs de chute de 4 m, le processus de brèche par surverse est allé à son terme avec moins de 10 cm de déversement pendant quelques heures.

Il est également à signaler que seules deux brèches ont pu être fermées en crue, celle de Beaumont en 1994 et celle de Ventabren en 2016. Les secteurs, où se sont produits ces brèches, comportaient un ségonnal ce qui a permis la mise en œuvre en bacs de canard, d'enrochements côté fleuve de plus en plus petits pour limiter le débit fuite et de terminer le colmatage par la mise en œuvre de matériaux fins dès que le débit de fuite était suffisamment faible. Les hauteurs de charge mesurées depuis l'amont étaient de 1,6 m en 1994 et 0,7 m en 2016. Aucune intervention hélicoptée avec largage de bigs-bags n'a permis le colmatage de brèche

Statistiques des désordres

L'analyse des désordres a été menée sur les crues de novembre 2002, décembre 2003 et novembre 2016, qui sont très bien documentées. La crue de novembre 2002 est une crue longue et moyenne en termes de débit ($Q = 9\,500\text{ m}^3/\text{s} - T = 20\text{ ans}$) ; la crue de décembre 2003, est une crue rapide et intense ($Q = 11\,500\text{ m}^3/\text{s} - T = 100\text{ ans}$) et la crue de novembre 2016, une crue fréquente et rapide ($Q = 8\,300\text{ m}^3/\text{s} - T \leq 10\text{ ans}$). L'origine des désordres pour les crues de novembre 2002 et de décembre 2003 suit la même tendance pour les deux crues et suit la même tendance que pour les brèches et départs de brèche. Le bilan figure en page suivante (tableau n°6).

43 % et 37 % des désordres respectivement pour la crue de novembre 2002 et décembre 2003 ont été initiés par érosion interne (suintement ou fuites d'eau limoneuse). Les suintements ou fuites d'eaux limoneuses proviennent essentiellement de terriers d'animaux fouisseurs ou de vides le long des ouvrages traversants. Certaines proviennent également d'anciennes brèches colmatées avec des matériaux pulvérulents ou de fissures liées à des transitions insuffisamment soignées lors de travaux de purge de terriers d'animaux fouisseurs (absence de redans lors de la fermeture de la digue).

Ces suintements ou fuites sont traités en périodes de crues par la mise en œuvre côté fleuve d'argile très plastique pour limiter le débit de fuite et par la mise en œuvre côté protégé de matériaux pulvérulents (laitier, matériaux de carrière) destinés à filtrer et drainer les infiltrations. Il a été posé, pour une intervention, un géotextile filtrant avec beaucoup de difficultés. Il est à noter l'importance d'avoir une hauteur suffisante de remblai drainant pour éviter le claquage de la recharge.

15 % (nov. 2002) et 14 % (déc. 2003) des désordres concernent des surverses ou des limites de surverse. Les surverses constatées sur des points bas localisés ont donné lieu à des interventions d'urgence réalisées avec succès (rechargement en crête). Les autres surverses correspondent à des dépassements de cote d'ouvrage, qui n'ont pas donné lieu à brèche, excepté localement où des départs de brèche ont été occasionnés (Cf. chapitre précédent).

Il est à noter que les surverses généralisées ne donnent pas lieu à intervention d'urgence, compte tenu des conséquences que pourraient avoir de telles interventions sur d'autres parties du système d'endiguement.

12 % (nov. 2002) et 14 % (déc. 2003) des désordres concernent des fuites dans des ouvrages traversants. Certaines sont liées à des défaillances d'étanchéité des organes de fermeture, d'autres à l'absence d'obturation des mêmes organes, soit par incapacité à manœuvrer, soit par oubli. Ces désordres ont donné lieu à des interventions d'urgence, toutes couronnées de succès, qui ont consisté à mettre des gros blocs d'enrochements ou des big-bags de préférence côté fleuve complété par des matériaux plus fins.

Depuis, de nombreux ouvrages traversants défaillants ont été purgés (environ une centaine sur un parc initial de 450).

12 % (nov. 2002) et 18 % (déc. 2003) des désordres ont été des suintements d'eaux claires, qui ont fait l'objet d'une surveillance régulière et parfois d'interventions d'urgence quand le débit fuite était trop important. Les investigations géotechniques menées sur ces zones fuyardes n'ont pas révélées la présence de sable, ce qui laisse penser que ces suintements proviennent de fissures liées à d'anciens travaux de réparation (transition insuffisamment soignée).

TABLEAU 6 : CRUES DE NOVEMBRE 2002 ET DE DECEMBRE 2003 – BILAN DES DESORDRES PAR INITIATEUR DE RUPTURE

Initiateur du désordre		Nov. 2002			Déc. 2003			Nov. 2016	
		Nb	%	Urg*	Nb	%	Urg*	Nb	%
Surverse	point bas localisé (encoule)	3	15	3	3	14	2	1	7
	dépassement cote de l'ouvrage	2		2	4		2		
	limite de surverse	0		0	2		0		
Suintement/fuites d'eaux limoneuses (érosion interne)	terrier de fousseurs (blaireau ou lapin)	10	43	9	10	37	3	1	13
	au droit d'ancienne brèche	3		1	8		0		
	ancien terrier	0		0	2		2		
	érosion le long d'un ouvrage traversant	1		1	5		3	1	
Défaillance fonctionnelle ouvrage traversant (vanne)	fuite dans ouvrage	4	12	4	9	14	2	7	47
Suintement d'eaux claires (écoulement sans érosion)	au droit de paléo-chenal	2	12	2	0	18	1	4	33
	au droit d'ancienne brèche ou transition liée à réparation	2		2	4		0		
	origine non connue	0		0	8		0		
Affouillement	pied côté fleuve	4	12	0	11	16	1		0
Glissement	talus côté terre	1	6	0		1	0		0
	talus côté fleuve	1		1	1		0		
TOTAL		33	100	25	67	100	16	15	100

* nombre de désordres ayant fait l'objet de travaux d'intervention d'urgence

12 % (nov. 2002) et 16 % (déc. 2003) des désordres ont concerné des glissements de berge liés à des affouillements. Tous ces désordres ont été initiés soit en extrados, soit au droit de fosses d'érosion. Certains désordres situés directement en amont des brèches s'expliquent par l'augmentation de la pente hydraulique liée aux brèches. On note également l'absence d'affouillement dans les secteurs du fleuve où la présence d'épis et/ou de panneaux de fonds réalisés pour la navigation sur le Rhône, est notée, ce qui montre le rôle protecteur de ces ouvrages vis-à-vis de l'affouillement.

6 % (nov. 2002) et 1 % (déc. 2003) concernent des glissements de talus côté fleuve dus à la raideur des talus ou, côté zone protégée, dus à la présence d'une couche sableuse très perméable (épaisseur d'environ 50 cm).

La comparaison entre les deux crues, montre qu'il y a deux fois plus de désordres en 2003 qu'en 2002 malgré le caractère rapide de la crue : l'intensité du chargement prévaut sur la durée. La diminution de la proportion des désordres liés aux fousseurs entre 2002 et 2003, s'explique par un traitement préventif croissant des terriers entre ces deux dates. La proportion de désordres liés à l'affouillement croît sensiblement entre les deux crues. Ce constat avait été relevé par Irstea (ex Cemagref) dans ses rapports post-crue. Il s'explique par le caractère plus rapide de la montée de crue et donc l'importance de la pente hydraulique lors de l'événement. La pente hydraulique a également été accrue sur certains tronçons du fleuve, du fait de l'apparition des brèches qui sur certains tronçons du fleuve ont engendré des pentes hydrauliques deux à trois fois plus importantes qu'avec un écoulement sans brèche.

Sur les 33 désordres recensés en novembre 2002, 25 interventions d'urgence ont été commandées. En décembre 2003, 67 désordres ont été recensés et 16 interventions d'urgence ont été commandées. Le détail des interventions par initiateur figure dans le tableau n°6. L'écart des interventions d'urgence entre les deux crues s'explique par la durée des crues (15 jours en 2002 et 3 jours en 2003). Les statistiques des désordres de la crue de novembre 2016 sont différentes. On note une surverse de quelques centimètres toujours localisée en aval du delta en rive droite du Petit Rhône. Les suintements d'eaux claires ont été observés aux lieux habituels. La plupart des désordres concernent des fuites au droit des organes de fermeture des ouvrages hydrauliques.

Enseignement du REX sur les désordres pour les EDD

L'étude accidentologique a montré que l'initiation d'un mode de rupture n'engendrait pas automatiquement une brèche et que cette dernière était le processus de plusieurs étapes décrites dans [1] et quantifiées dans [3], [4] et [5]. En

novembre 2002, sur les 33 désordres relevés, un seul a donné lieu à un départ de brèche et un autre à une brèche. En décembre 2003, sur les 67 désordres relevés, 2 ont donné lieu à des départs de brèche et 4 à des brèches (dont 2 dans les digues de protection des trémies ferroviaires, soit hors du périmètre Symadrem).

Les tableaux n°7 et n°8 intègrent les résultats des tableaux n°5 et n°6 et donnent respectivement pour les crues de novembre 2002 et de décembre 2003, le nombre respectivement de désordres (Des.), le nombre d'interventions d'urgence (Urg.), le nombre de départs de brèche (Dp.Br) et le nombre de brèches (Br.) par initiateur de rupture. Ces données permettent de voir selon l'initiateur l'évolution possible du désordre en départ de brèche puis en brèche ainsi que l'impact des interventions d'urgence.

Pour la crue de novembre 2002, on constate que globalement les interventions d'urgence sur les surverses (point bas localisé) ont permis d'éviter la formation de brèche. Les interventions sur les terriers visibles ont également été couronnées de succès mais n'ont pas été possibles quand les terriers étaient masqués. Les interventions d'urgence ont également été réalisées avec succès sur les défaillances fonctionnelles des ouvrages hydrauliques traversants (OHT) et sur les érosions de conduit le long des conduites traversantes. Les affouillements n'ont pas nécessité d'interventions pendant la crue et les interventions pour pallier le glissement de talus côté fleuve en décrue se sont déroulées relativement facilement.

TABLEAU 7 : CRUE DE NOVEMBRE 2002 (T=20 ANS)
ANALYSE DU PROCESSUS DE BRECHE PAR INITIATEUR

Initiateur	Des.	Urg.	Dp.Br	Br.
Surverse	6	5	1	0
Erosion de conduit par terrier	11	9	1	1
Erosion de conduit le long d'un OHT	1	1	0	0
Erosion contact (ancienne brèche)	3	1	0	0
Erosion interne – autre	0	0	0	0
Affouillement	4	0	0	0
Glissement côté terre	1	0	0	0
Glissement côté fleuve	1	1	0	0
Défaillance fonctionnelle OHT	4	4	0	0
Total	31	21	2	1

Pour la crue de décembre 2003, les surverses ont été logiquement plus nombreuses compte tenu de l'occurrence de la crue, mais il est néanmoins difficile de conclure compte tenu du fait que pour les 3 brèches par surverse les

phénomènes d'érosion interne ne sont pas à exclure. À l'instar de 2002, les interventions d'urgence ont permis d'arrêter l'érosion de conduit le long des ouvrages traversants et stopper les fuites dans les ouvrages traversants. L'affouillement et l'érosion de contact très présentes n'ont quant à elles quasiment pas nécessité d'interventions d'urgence compte tenu de leur cinétique d'érosion. Il est en est de même pour le glissement.

TABLEAU 8 : CRUE DE DECEMBRE 2003 (T=100 ANS)
ANALYSE DU PROCESSUS DE BRECHE PAR INITIATEUR

Initiateur	Des.	Urg.	Dp.Br	Br.
Surverse	13	4	4	3
Erosion de conduit par terrier	12	5	0	0
Erosion de conduit le long d'un OHT	6	4	1	0
Erosion contact (ancienne brèche)	8	0	0	0
Erosion interne – autre	1	0	1	1
Affouillement	11	1	0	0
Glissement côté terre	0	0	0	0
Glissement côté fleuve	1	0	0	0
Défaillance fonctionnelle OHT	9	2	0	0
Total	61	16	6	4

Le comportement du système en novembre 2016 a été différent du fait de la moindre intensité de la crue, mais a montré que des brèches pouvaient se produire même avec une faible charge d'eau. L'étude montre que les modes de rupture initiateurs à prendre en compte dans les études de dangers sont par ordre décroissant d'importance : l'érosion de conduit dans les terriers de fousseurs, la surverse, l'érosion de conduit le long des ouvrages traversants et l'érosion le long de fissures dues à la vieillesse du remblai ou le long de transitions insuffisamment traitées.

La défaillance fonctionnelle d'ouvrages traversants est également un désordre fréquent, mais qui peut être corrigée aisément lors d'intervention d'urgence. Par ailleurs, les conséquences de ces défaillances sur la zone protégée sont moindres que celles d'une brèche.

Caractéristiques des brèches et conséquences sur la zone protégée

De manière à mieux aborder l'étude des venues d'eau exigée

par la réglementation, l'étude accidentologique a également porté sur les caractéristiques géométriques des brèches et leur conséquence sur la zone protégée.

Depuis 1840, 10 crues ont donné lieu à inondation. 7 de ces crues ont pu être analysées. Le tableau n°9 indique le débit maximal de ces crues mais également le débit estimé lors de la formation de la première brèche, le nombre de brèches occasionnées, la largeur maximale et cumulée des brèches ainsi que les volumes de déversements dans la zone protégée et la part en % du volume déversé au travers des brèches sur le volume de crue contenu par les digues (au-dessus de 6 000 m³/s).

Si la crue centennale de décembre 2003, qui a causé plus de 700 millions d'euros de dommages, peut être qualifiée d'important sinistre, les conséquences de cette dernière n'en demeurent pas moins très en deçà des conséquences des crues de 1840 et 1856 qui ont occasionné le déversement respectivement d'environ 2 et 3 milliards de m³ dans la zone protégée, soit un volume très sensiblement supérieur à la contenance du barrage de Serre Ponçon (un peu plus de 1 milliard de m³) et ont laissé des stigmates perceptibles dans le paysage.



PHOTO 4 : TARASCON MAI 1856 (SOURCE PPRi TARASCON)



PHOTO 5 : TARASCON LAISSE DE LA CRUE DE 1856 (©SYMADREM)

TABLEAU 9 : PERIODE 1840-2016 : CARACTERISTIQUES ET CONSEQUENCES DES BRECHES

Crue	Débit max crue (m ³ /s)	Occurrence (années)	Brèche (Nb.)	Largeur Brèche Max (m)	Largeur cumulée des brèches (m)	Volume Déversement (Millions m ³)	Volume déversé/Volume de la crue (en %)
Novembre 1840	13 000	300	18	480	2 480	2 800	72 %
Mai 1856	12 500	200	9	500	1 230	1 800	82 %
Octobre 1993	9 000	15	4	40	112	130	16 %
Janvier 1994	10 300	40	2	65	100	60	4 %
Novembre 2002	9 400	20	1	15	15	1,6	0 %
Décembre 2003	11 500	100	4	130	266	227	23 %
Novembre 2016	8 300	< 10	1	3	3	0,03	0 %

Les figures n°4 et n°5 permettent de voir l'évolution de la largeur maximale des brèches sur respectivement le Petit Rhône et le Rhône en fonction de la hauteur estimée de charge au droit de la brèche mesurée depuis le terrain naturel aval. Sur le Petit Rhône, on constate une proportionnalité de la largeur maximale de la brèche en fonction de la hauteur de charge, qui s'explique facilement par la proportionnalité entre la hauteur de charge et la force tractrice s'exerçant sur les flancs latéraux de la brèche lors du processus d'élargissement. Cette proportionnalité permet même d'en déduire une certaine tendance linéaire, qui pourrait être estimée de façon sécuritaire à $L_{brèche} = 72 \times H_{charge} - 123$ (avec L et H exprimées en m). La brèche de Claire Farine de 2003 qui est la seule brèche initiée par surverse (en dehors des deux brèches dans les digues de protection des trémies ferroviaires) suit un comportement similaire aux autres brèches initiées par érosion interne.

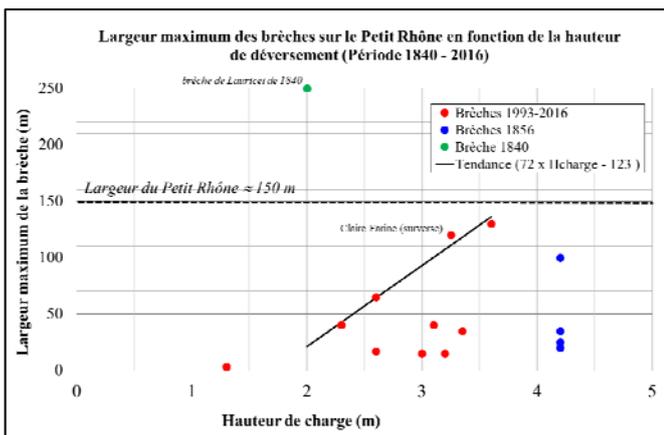


FIGURE 4 : PETIT RHONE - LARGEUR DES BRECHES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHARGE

Sur le Grand Rhône, la proportionnalité est moins apparente bien qu'elle doive également exister. On constate que les brèches de 1840 (à l'exception d'une sur le Grand Rhône)

initiée par surverse suivent un comportement analogue à celles de 1856 toutes initiées par érosion interne.

Sur les deux bras du fleuve, la largeur des brèches semble plafonnée par la largeur du fleuve (150 m sur le Petit Rhône et 500 m sur le Rhône). Sur le Grand Rhône, on note une seule brèche par érosion interne en 1840, pour une hauteur de charge de 1,5 m, qui ne nous permet pas de dresser une analyse.

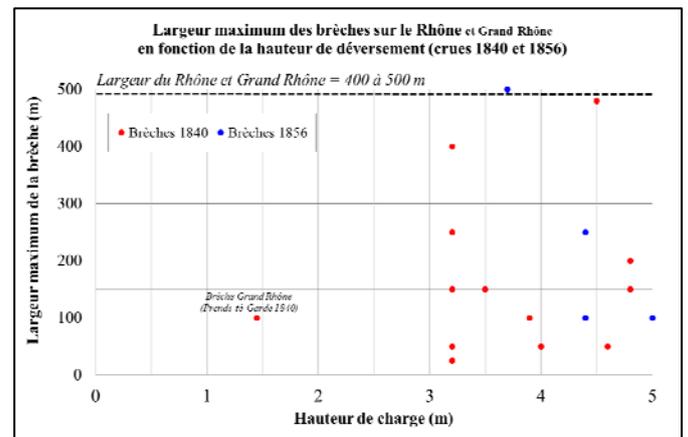


FIGURE 5 : RHONE - LARGEUR DES BRECHES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHARGE

La figure n°6 illustre la parfaite corrélation entre la largeur cumulée de brèches et le volume de déversement au travers des brèches en fonction du débit du Rhône en amont du delta. L'évolution de la largeur cumulée de brèches et du volume de déversement au travers des brèches suit une tendance exponentielle vis-à-vis du débit en tête de delta. L'évolution très sensible de ces deux indicateurs au-delà du débit de 11 500 m³/s s'explique par le fait qu'en 1840 et 1856, la quasi-totalité des brèches a été occasionnée sur le Rhône entre Beaucaire et Arles, alors que l'ensemble des brèches

sur la période récente a été observé sur le Petit Rhône qui ne prend que 12 % du débit total en fonctionnement sans brèche et de l'ordre de 20 % quand des brèches se produisent (ce qui est dû à l'appel de débit lié à l'abaissement de ligne d'eau causé par les brèches).

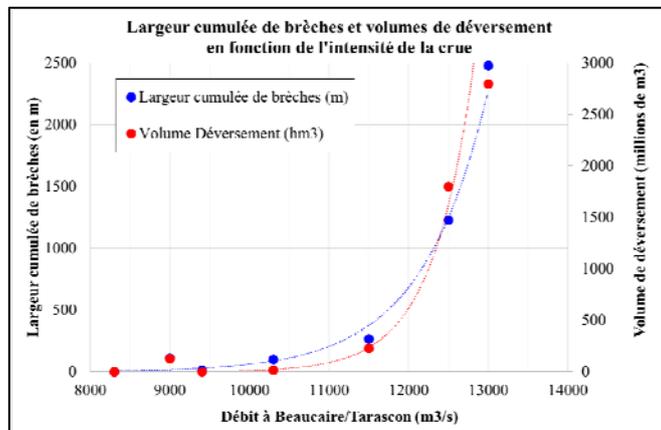


FIGURE 6 : LARGEUR CUMULEE DE BRECHES ET VOLUME DE DEVERSEMENT EN FONCTION DU DEBIT DU RHONE

En décembre 2003, les digues du Rhône étaient en limite de rupture comme en attestent les débuts de surverse contenus au droit de la station BRL en rive droite et les infiltrations dans le ballast du remblai ferroviaire en rive gauche. Le sinistre de 2003 aurait très bien pu se transformer en catastrophe comparable aux catastrophes de 1840 et 1856 avec un surplus de débit de crue de quelques centaines de m³/s.

Le tableau n°9 donne également le rapport du volume déversé au travers des brèches sur le volume des crues contenu par les digues, qui correspond au volume calculé quand le débit est supérieur à la cote du pied de digue amont, soit un débit d'environ 6000 m³/s qui correspond à la crue biennale. Ce rapport a été d'environ 1/4 en décembre 2003 contre 3/4 en 1840 et 1856.

Conclusion

L'étude accidentologique des ouvrages et des conséquences de leur ruine sur la zone protégée a permis de déterminer pour l'analyse de risques liés aux ouvrages en remblai 11 scénarios de brèche [3] impliquant un ou plusieurs modes de rupture et 1 scénario de défaillance fonctionnelle. Elle a également permis d'établir des arbres d'événements (Cf. figure n°7) pour chacun des scénarios tenant compte non seulement des phases d'initiation caractérisées par l'apparition des désordres mais également des autres étapes que sont la continuation et la progression [1]. Ces arbres d'événements ont également intégré les étapes de détection des désordres et d'intervention d'urgence qui ont permis d'éviter, lors des crues de 2002 et 2003 et plus récemment en

2014 et 2016, la formation ou l'extension de brèches.

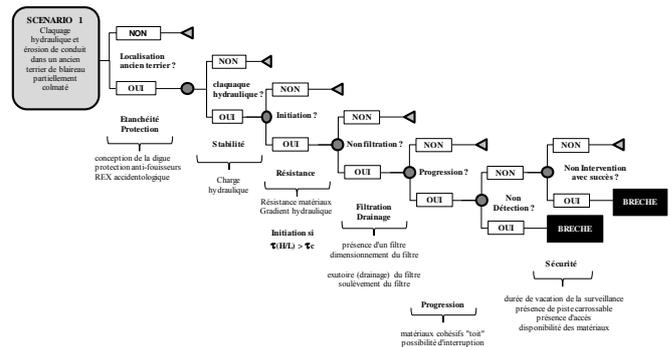


FIGURE 7 : EXEMPLE D'ARBRE D'EVENEMENTS [3]

L'évaluation des scénarios de brèches a été conduite suivant une méthode probabiliste calée sur le retour d'expérience accidentologique. On se reportera sur [3], [4] et [5] pour de plus amples détails.

L'étude accidentologique des conséquences des brèches sur la zone protégée a permis de constater que, dans le cas du delta du Rhône, en dehors des bandes de sécurité derrière les digues, c'était le volume de déversement au travers des brèches qui était le facteur principal de caractérisation de la dangerosité derrière les digues. Cette donnée a permis de bâtir des scénarios d'inondation plausibles en fonction du débit de pointe de crue en tête de delta.

Références

- [1] ICOLD (2015). *Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations – bulletin n°164 – Volume 1: internal erosion processes and engineering assessment.*
- [2] BONNEFOY R., ROYET P. (1994). *Désordres relevés sur les digues de Camargue pendant les crues du Rhône d'Octobre 1993 et janvier 1994 et premiers travaux d'urgence –* Communication orale au colloque technique de la C.F.G.B.
- [3] 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
- [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