

Analyse multicritères (AMC) inondation dans le grand delta du Rhône : mise en place d'une méthode probabiliste d'évaluation des enjeux impactés et des dommages

Flood multicriteria analysis (AMC) in the delta of the Rhone river: implementation of a probabilistic approach to evaluate impacted issues and damages

T. Mallet¹, F. Mateo¹

¹ SYMADREM, Arles, France, symadrem@symadrem.fr

Résumé

Suite aux inondations causées par la crue de décembre 2003, l'Etat a mis en place une stratégie de prévention des inondations à l'échelle du bassin versant : le plan Rhône décliné dans le grand delta du Rhône par le SYMADREM (Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des digues du Delta du Rhône et de la Mer) dans un programme de sécurisation des ouvrages de protection contre les crues du Rhône du barrage de Vallabrègues jusqu'à la Mer [9]. Sur les 450 millions d'euros d'investissements envisagés à l'horizon 2032, 215 millions d'euros ont été investis de 2007 à 2022 de Beaucaire/Tarascon à l'aval du centre-ville d'Arles.

En perspective des travaux à venir sur les digues du Petit Rhône et du Grand Rhône aval dont le montant est estimé à 153 millions d'euros, le SYMADREM a réalisé une AMC inondation sur son périmètre de compétence, qui concerne trois systèmes d'endiguement fluviaux, 20 communes, 102 000 personnes et qui couvre une superficie de 1 500 km²,

Sur la base de fonctions de dommages développées par le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) [3], les dommages monétaires ont été calculés pour 220 scénarios d'inondation issus des études de dangers (EDD) [10]. Un travail analogue a également été mené pour les enjeux non monétarisés : le nombre de personnes inondées en situation ou non de danger et le nombre d'emplois impactés.

Les bénéfices monétaires et non monétaires, générés par les travaux du programme de sécurisation, ont été appréciés par la comparaison du Dommage Moyen Annuel (DMA), du Nombre Moyen Annuel (NMA) de personnes et d'emplois impactés par les inondations entre l'état initial de 2007, et l'état final correspondant à la sécurisation complète des ouvrages, ainsi qu'entre plusieurs états intermédiaires correspondant à différentes phases clés du programme.

Pour le calcul du DMA, du NMA et du Volume Déversé Moyen Annuel (VDMA), un modèle probabiliste a été développé. Calé sur l'observation des événements passés [11] et alimenté par les données issues des études de dangers [10], l'outil probabiliste a utilisé l'inférence Bayésienne permettant de passer de la probabilité de brèche de chaque tronçon de digue à la probabilité globale de brèche des systèmes d'endiguement et *in fine* du grand delta. Les résultats produits confirment *a posteriori* la pertinence socio-économique des travaux du plan Rhône.

Mots-clés

Coût-bénéfice, enjeu, probabilité, risque.

Abstract

Following the floodings caused by the December 2003 flood, French State settled a prevention strategy against the floodings at the watershed scale : the “Plan Rhône”, defined in the Rhône Great Delta by the SYMADREM (Public institution for management of river and sea levees in the Rhône Delta), in a safety program for the protection works against the Rhône floods from the Vallabrègues dam to the sea [9]. For the 450 million euros considered in investment till 2032, 215 million euros were invested between 2007 and 2022 from Beaucaire/Tarascon, to downstream Arles city center.

In anticipation of upcoming works on the Petit Rhône and Grand Rhône downstream levees, the amount of which is estimated at 153 million euros, the SYMADREM carried on a flood multi-criteria analysis on its scope of competence, which concern three levees systems, 20 municipalities, 102 000 people and covers a 1 500 km² area.

Based on damages functions developed by the CGDD [3], the monetary damages were calculated for 220 flooding scenarios coming from the hazard studies [10]. A similar job was also carried out for the non-monetary issues : the number of people flooded in hazardous situation or not and the number of employments impacted.

The monetary and non-monetary benefits, generated by the safety program works, were valued by the comparison of the Expected Annual Damage (EAD), the Expected Annual Number (EAN) of people and employments impacted by the floodings, from the initial status in 2007, and the final status relevant to the works global safety, and several intermediary stages, corresponding to the different program key stages.

For the EAD, EAN and EASD (Expected Annual Spilled Volume), a probabilistic model was developed. Based on the observation of the past events [11] and supplied by data coming from the hazard studies [10], the probabilistic tool used the Bayesian inference allowing to go from the breach probability of each levee section, to the global breach probability of the levees system and *in fine* of the Great Delta. The results produced confirm *a posteriori*, the socio-economical pertinence of the “Plan Rhône” works.

Key Words

Cost-benefit, issue, probability, risk

Introduction

Le grand delta du Rhône est un territoire très exposé au risque d'inondation du fleuve. Depuis 1840, huit crues ont donné lieu à des inondations majeures [10]. La crue des 3 et 4 décembre 2003 (période de retour de 80/100 ans), qui a occasionné 4 brèches dans les ouvrages de protection ; causant le déversement de 217 millions de m³ dans la zone protégée ; l'inondation de plus 12 000 personnes et générant 700 millions d'euros de dommage, a révélé la nécessité d'une politique de prévention des inondations cohérente et solidaire sur l'ensemble du bassin rhodanien : le Plan Rhône. Sur les 450 millions d'euros d'investissements envisagés à l'horizon 2032 [9], 215 millions d'euros ont été investis de 2007 à 2022 du barrage de Vallabrègues à l'aval d'Arles. Le prochain contrat de plan interrégional Etat-régions (CPIER) Plan Rhône 2021-2027 prévoit l'investissement de 128 millions d'euros sur les digues du Petit Rhône et de 25 millions d'euros sur les digues du Grand Rhône aval. C'est dans ce cadre qu'une AMC inondation du programme de sécurisation [9], des travaux déjà réalisés et des travaux à venir a été réalisée.

Diagnostic territorial et méthodologie d'évaluation des dommages monétaires

Le diagnostic territorial a consisté en un état des lieux et un géoréférencement des enjeux exposés aux inondations sur le territoire du grand delta du Rhône, couvrant une superficie de 1 500 km² et protégé par trois grands systèmes d'endiguement fluviaux constitués de 240 km de digues de protection. Les enjeux protégés concernent 45 000 logements, 23 000 activités économiques et industrielles, 84 000 hectares de parcelles cultivées et 275 établissements publics, ainsi que des dommages non monétaires : 102 000 résidents permanents et 35 000 emplois.

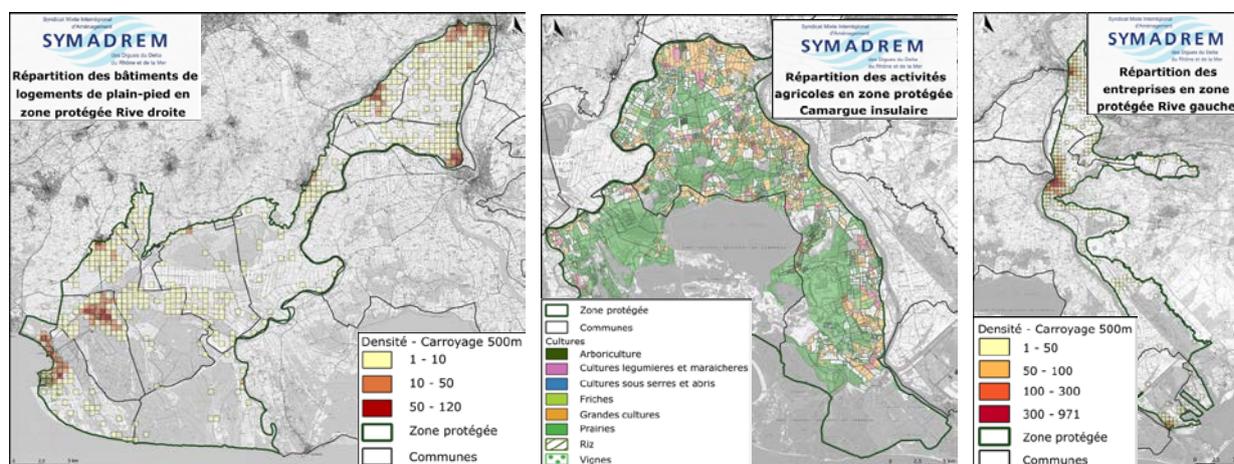


FIGURE 1. Répartition des enjeux économiques : logements, agriculture, entreprises dans les zones protégées Rive Droite, Camargue Insulaire, Rive Gauche (SYMADREM)

L'évaluation socio-économique a suivi la méthode d'évaluation définie dans le guide AMC inondations publié par le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) en mars 2018 [3]. Les dommages aux logements, aux activités économiques et aux établissements publics ont été évalués à partir des fonctions de dommages décrites dans le guide. Les dommages aux activités agricoles ont été de leur côté estimés à partir des fonctions de dommages représentatives du territoire, développées par la Chambre d'Agriculture du Gard (CA30) pour le compte du SYMADREM à partir du retour d'expérience de 2003 [2].

Plus de deux cents scénarios d'inondation, issus de modélisations hydrauliques réalisées dans le cadre des études de dangers [10], ont été exploités : 6 scénarios d'inondations historiques, 110 scénarios de brèches probables avec différents linéaires de brèches, différentes localisations et intensités de crue, ainsi que 90 scénarios d'inondation par surverse sans brèche concernant l'état initial, des états d'intermédiaires et l'état final.

Pour chaque scénario d'inondation, les dommages monétaires et non monétaires ont été calculés en distinguant la typologie des enjeux précités. En sus des enjeux cités dans le guide AMC [3], la population en situation de danger, définie comme la population pouvant être inondée par des hauteurs d'eau supérieures à 1 mètre et la population vulnérable, considérée comme la population âgée de moins de 18 ans et de plus de 65 ans, ainsi que celle vivant dans des logements de plain-pied [13], ont également été estimées pour l'ensemble des scénarios d'inondation étudiés.

Modèle probabiliste d'évaluation des enjeux impactés et des dommages

Le dommage moyen annuel (DMA), qui est un des paramètres structurants de l'analyse coût bénéfice, correspond à l'espérance annuelle mathématique de la variable aléatoire « dommage ». Cette dernière est la limite presque-sûre de la moyenne des résultats au cours de plusieurs expériences, quand leur nombre augmente à l'infini. Elle peut être estimée à partir d'une gamme de crues suffisamment étendue et représentative du fonctionnement du système d'endiguement de la manière suivante (1) :

$$DMA = \sum_1^m P(C_j). Dommages (C_j). \text{ avec } \sum_1^m P(C_j) = 1 \quad (1)$$

avec *Dommages (C_j)* : Dommages monétaires causés par une crue C_j ; *P(C_j)* : probabilité annuelle d'occurrence de la crue C_j et *m* : nombre de crues considérées.

Le fonctionnement en crue des systèmes d'endiguement du grand delta du Rhône étant très complexe et encore très aléatoire en aval d'Arles, le recours à un modèle probabiliste s'est avéré nécessaire pour tenir compte des modes d'inondation possibles : avec ou sans brèches ; du retour d'expérience historique ; de la sécurisation des digues en amont d'Arles comprenant notamment l'aménagement de digues résistantes à la surverse. Le modèle mis en œuvre tient également compte de l'interdépendance entre les trois systèmes d'endiguement fluviaux et de l'interdépendance au sein d'un même système d'endiguement ; la brèche ayant des effets directs sur la ligne d'eau et par conséquent sur la sollicitation des digues situées en amont, en aval ou sur la rive opposée.

Dans le cadre de la réalisation des études de dangers, le SYMADREM a développé en 2014 [10] un modèle d'évaluation de la probabilité de brèche dans les digues en fonction de leur état et de la sollicitation en période de crue. Ce modèle, qui étudie treize scénarios de brèches, permet de disposer de courbes de fragilité pour chaque tronçon homogène constituant les différents systèmes d'endiguement. Il a permis de construire un atlas cartographique à destination des autorités compétentes en matière de secours au population, intégrant l'ensemble des scénarios probables à certains en fonction du débit en tête de delta [12]. Il est cependant sécuritaire puisqu'il somme entre eux les scénarios d'inondation. Le développement d'un modèle probabiliste intérateur des différents scénarios d'inondation et tenant compte de l'interdépendance au sein d'un même système et entre systèmes est apparu nécessaire pour disposer d'une estimation plus objective du risque. La variable retenue pour la construction et le calage du modèle a été le Volume Déversé Moyen Annuel (VDMA), jugée plus fiable que les autres variables de l'AMC. Les cinq étapes de construction du modèle sont décrites ci-après :

Etape 1 : Détermination d'un panel de crues représentatif du fonctionnement sans brèche en amont d'Arles et avec brèches en aval d'Arles

Huit crues ont été retenues avec des périodes de retour estimées respectivement à 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 ; 100 ; 200 et 1000 ans [6].

Etape 2 : Choix et probabilité des scénarios représentatifs d'inondation par brèche par système d'endiguement

Pour les crues biennale et quinquennale, un volume de déversement nul a été retenu. Pour la crue décennale, il a été retenu un volume forfaitaire sur la base du Retour d'Expérience (REX) de 2016 [11]. Pour les crues vingtennales et supérieures, entre six et neuf scénarios d'inondation par brèche ont été retenus par système d'endiguement et complétés par respectivement des scénarios sans inondation en l'absence de surverse ou, par un scénario de surverse sans brèche en cas de déversement sur les digues. Le choix de scénarios d'inondation mono-brèche a été retenu. Bien que cette hypothèse ne suive pas le retour d'expérience historique, l'analyse de la chronologie des brèches de 1840 à 2003 [11] montre que les brèches ont commencé à se former en aval du système d'endiguement et que leur débit a sensiblement diminué lors de la formation des brèches situées en amont. Globalement, la somme des volumes de déversement des brèches passées est du même ordre de grandeur que le volume d'un scénario mono-brèche. La probabilité des scénarios d'inondation par brèche est celle calculée dans les études de dangers [10].

Etape 3 : Probabilité de brèche par système d'endiguement

La probabilité de brèche du système d'endiguement dépend du degré de corrélation ou d'indépendance des scénarios d'inondation entre eux [1]. Elle peut être encadrée de la manière suivante (2) :

$$\text{Max} (P_i) \leq \text{probabilité globale de brèche du système } P(B) \leq 1 - \prod_1^n (1 - P_i) \quad (2)$$

Avec P_i : probabilité du scénario d'inondation i et $P(B)$: probabilité globale de brèche du système.

Dans l'hypothèse d'une corrélation parfaite entre scénarios, on retient la probabilité maximale des scénarios (borne inférieure). Dans l'hypothèse d'une indépendance parfaite entre les scénarios, la règle de Morgan peut être appliquée (borne supérieure). Le degré d'indépendance ou de corrélation des scénarios d'inondation entre eux a été évalué à dire d'expert à partir de notre connaissance des lignes d'eau le long des systèmes d'endiguement et de l'effet des brèches sur ces dernières. Les hypothèses retenues sont les suivantes : parfaite corrélation des scénarios de brèches sur le Grand Rhône et indépendance des autres scénarios d'inondation. La probabilité de brèche de chaque système a ainsi été estimée de la manière suivante (3) :

$$P_B = 1 - \prod_1^n (1 - \text{Max}(P_i)) \quad (3)$$

- P_i : probabilité d'un scénario de brèche i , considéré indépendant des autres (i variant de 1 à n),
- $\text{Max}(P_i)$: probabilité maximale des scénarios de brèches i , considérés corrélés entre eux,
- n est le nombre de scénarios indépendants envisagés

Etape 4 : Volume de Déversement Moyen Annuel (VDMA) par système d'endiguement

La probabilité de brèche du système ayant été déterminée, il a été retenu l'hypothèse que les scénarios d'inondation étaient collectivement exhaustifs et mutuellement exclusifs, ce qui a permis, à l'aide de la formule des probabilités totales théorisée par P.S. Laplace [7] et reposant sur l'inférence Bayésienne, d'estimer, de la manière suivante (4), le poids de chaque scénario d'inondation mono-brèche dans le scénario d'inondation global « intégrateur » du système.

$$P(B_i/I) = \frac{P(B_i).P(I/B_i)}{P(I)} \quad (4)$$

Avec :

- $P(B_i/I)$: probabilité *a posteriori* que la cause d'inondation soit issue de B_i ;
- $P(B_i)$: probabilité *a priori* de la cause du scénario d'inondation par brèche ;
- $P(I/B_i)$: probabilité de brèche B_i (source EDD) ;
- $P(I)$: probabilité totale de l'inondation par brèche = $\sum_1^n P(B_i).P(I/B_i)$.

Concernant la probabilité *a priori* de la cause du scénario d'inondation, deux hypothèses étaient possibles, soit considérer une hypothèse d'équiprobabilité des causes, soit tenir compte du retour d'expérience historique. C'est cette dernière hypothèse qui a été retenue. Un poids plus important a ainsi été donné aux brèches du Petit Rhône et du Grand Rhône pour les crues inférieures à la crue de décembre 2003 et inversement un poids plus important a été donné aux brèches du Rhône pour les crues supérieures ou égales à la crue de décembre 2003. Au final, l'espérance annuelle mathématique de la variable aléatoire « volume de déversement » est donnée par l'équation suivante (5) (VOL : volume de déversement du scénario d'inondation avec ou sans brèche) :

$$VDMA = \sum_{j=1}^m P(C_j). [(1 - P(B)).VOL_{surverse sans brèche} + P(B). \sum_{i=1}^n P(B_i/I).VOL_{brèche i}] \quad (5)$$

La figure de gauche ci-après (cf. Figure.2) permet d'illustrer l'espérance mathématique calculée du volume déversé en rive droite du Rhône en fonction du débit en tête de delta et de l'état d'aménagement. En 2007, on constate que pour une crue supérieure à celle de décembre 2003, les probabilités de brèches sur le Rhône et les volumes associés étaient si élevés (brèches 1&2) que le poids de ces brèches « dictait » l'espérance du volume déversé pour les crues supérieures à celle de décembre 2003 (couleur rouge). Les travaux de renforcement menés entre Beaucaire et Fourques ont ramené ces probabilités à des seuils si faibles que ce sont aujourd'hui les brèches du Petit Rhône qui donnent leur poids à l'espérance du volume déversé (couleur jaune). En 2027, l'ensemble de la rive droite du Petit Rhône devrait être conforté. L'espérance du volume déversé (couleur verte) suivra alors le scénario d'inondation par surverse sans brèche.

Etape 5 : Volume de Déversement Moyen Annuel (VDMA) dans le grand delta & validation du modèle

L'interdépendance entre systèmes d'endiguement a été traitée, à partir la formule suivante (6) version moderne de la formule de P.S. Laplace [7], qui tient compte des observations du passé et de la situation actuelle.

$$P = \frac{\sum k+t}{\sum n+s} \quad (6)$$

- Avec P : probabilité de mobilisation du système d'endiguement pour une crue C_j donnée ;

- k : nombre de systèmes d'endiguement inondés par le passé pour une crue C_j donnée ;
- n et s : nombre de systèmes d'endiguement potentiellement inondables (=3) par le passé et dans la situation actuelle pour une crue C_j donnée ;
- t : nombre de systèmes d'endiguement inondables pour une crue considérée C_j .

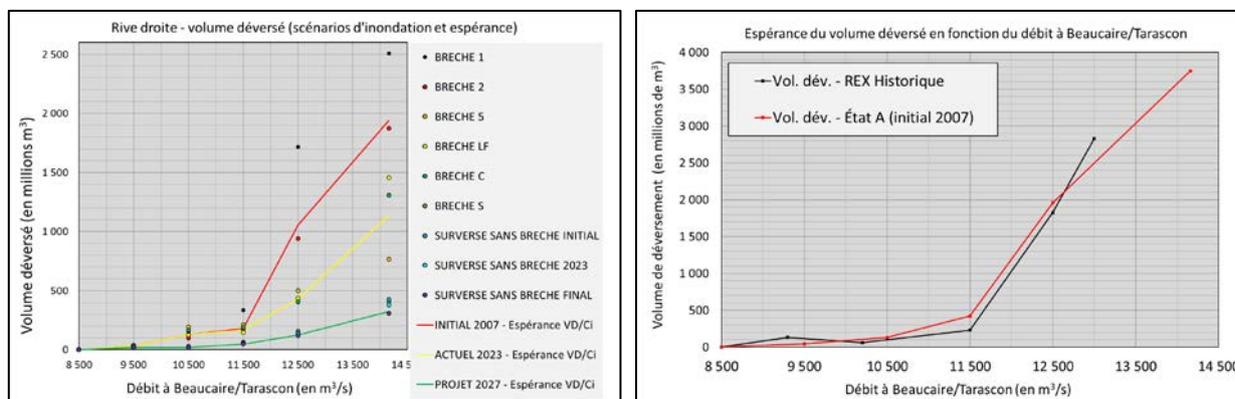


FIGURE 2. Espérance du volume déversé en rive droite en fonction du débit à Beaucaire/Tarascon pour trois états d'aménagement (Cf. figure de gauche) et dans le grand delta en 2007 ainsi que le REX historique (cf. figure de droite)

Le VDMA du grand delta est égal à la somme des VDMA des trois systèmes pondérés par ce coefficient P . La figure de droite ci-avant présente le VDMA Grand Delta en 2007, croisé avec le volume des inondations historiques en fonction du débit en tête de delta. On constate que les deux courbes suivent la même tendance, ce qui a permis de valider le modèle sans rétro-calage supplémentaire. Les autres variables DMA et NMA ont été calculées selon le même modèle.

Ecart entre le modèle monétaire du guide AMC 2018 et le REX 2003

Les dommages monétaires ont été estimés pour l'inondation de décembre 2003 à 365,5 M€, ce qui est sensiblement éloigné de l'évaluation officielle faite en 2004, qui est de 560 M€ et qui a été revalorisé en 2008 par la DREAL AURA (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Auvergne-Rhône-Alpes) à 700 M€ [5].

Le tableau ci-après montre les écarts par type d'enjeux monétarisés. On constate ainsi un rapport qui va du simple au double pour l'habitat et les activités économiques entre le modèle monétaire du guide AMC et l'évaluation officielle et dans un rapport identique mais inverse entre les fonctions dommages de la CA30 et l'évaluation officielle. Pour ce dernier point, la différence s'explique par la prise en compte par la CA30 des dommages indirects (pertes prématurées de capital végétal) constatés quelques années après l'inondation.

Compte tenu de cet écart important, il a été décidé de mener une analyse de sensibilité poussée de manière à donner des plages de valeurs plutôt que des valeurs fixes en résultats. Cette dernière a porté sur la probabilité d'occurrence des crues, sur les probabilités conditionnelles de brèche après travaux et sur les trois modèles monétaires (guide AMC, estimation officielle, revalorisation DREAL AURA). La sensibilité de la probabilité d'occurrence des crues a ainsi été testée avec les quantiles calculés à partir respectivement d'une loi GEV et d'une loi de GUMBEL [6].

TABLEAU 1. Dommages calculés et observés pour la crue de décembre 2003

Scénarios inondation et crue décembre 2003	Montant des dommages en fonction des indicateurs du CGEDD				MONTANT TOTAL DES DOMMAGES
	M1 habitats	M2 économiques (hors secteur agricole)	M3 agricoles	M4 Etablissements publics	
Rive droite	44 615 020	35 518 121	78 865 816	202 352	159 201 308
Rive gauche	73 316 191	107 660 228	19 881 733	5 443 616	206 301 768
TOTAL RD+RG CGEDD (€ ₂₀₁₆)	117 931 210	143 178 349	98 747 549	5 645 968	365 503 076
TOTAL OBSERVATION 2003	213 000 000	296 000 000	51 000 000		560 000 000
Ratio OBSERVATION/CGEDD	1,8	2,1	0,5	0,0	1,5

En sus des fonctions dommages du guide AMC et de la CA30, la sensibilité sur le montant des dommages a été testée selon l'estimation officielle de 2005 de la crue réelle de décembre 2003 et selon l'estimation retenue par la DREAL AURA en 2008 [5] en appliquant des coefficients correcteurs par type d'enjeux. La sensibilité sur les probabilités de brèche a été testée en multipliant par 10 les probabilités conditionnelles de brèche estimés après travaux.

Impacts du programme de sécurisation

Coûts économisés grâce aux travaux

En plus des recommandations du guide AMC 2018 sur la prise en compte des coûts associés aux travaux, d'autres coûts ont été intégrés dans les calculs. Il s'agit des coûts de réparation des brèches après inondation, des coûts d'exploitation des ouvrages, pour lesquels le SYMADREM dispose d'un REX bien documenté, et des coûts d'évacuation préventive de la population. Les travaux du plan Rhône se traduisent par une économie sur ces coûts. Ils ont donc été intégrés comme coûts négatifs.

Le coût d'évacuation préventive de la population a été calculé sur la base du nombre d'individus habitant dans la « zone des 3 heures » à partir de la cartographie issue du scénario n°3 de l'arrêté EDD 2017 modifié. Ces coûts ont intégré uniquement la prise en charge des personnes évacuées préventivement et n'ont pas intégré les dépenses des Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS) et de la sécurité civile.

La réalisation du programme de sécurisation se traduirait ainsi à horizon 2032 par une économie, en moyenne par an, d'environ 470 000 euros sur le coût de réparation de brèches, 180 000 euros sur la masse salariale, 145 000 euros sur les dépenses liées aux travaux d'exploitation et de réparation courants et de près de 522 000 euros sur le coût d'évacuations préventives de la population.

Espérance du volume déversé, des dommages, personnes et emplois inondés en fonction du débit de crue

Les deux figures ci-dessous illustrent le gain apporté par les travaux en termes d'espérance du volume de déversement et des dommages monétaires en fonction du débit en tête du grand delta.

La courbe rouge illustre l'état initial de 2007, celle en jaune, la situation actuelle de 2023, celle en bleu clair de 2028 après le CPIER Plan Rhône 2021-2027 et en bleu foncé après sécurisation complète des digues.

L'espérance des dommages a fortement été abaissée par les travaux menés jusqu'à aujourd'hui. Actuellement, le risque de brèche est jugé infime en amont d'Arles et élevé en aval d'Arles avec des dommages attendus de 165 M€ pour la crue 11500 et de 475 M€ pour la crue de référence (12 500 m³/s). Ces dommages attendus étaient respectivement en 2007 de 460 M€ et 1 400 M€.

Après le CPIER Plan Rhône 2021-2027, l'espérance des dommages sera diminuée de manière très importante avec respectivement des montants de 37 M€ et de 225 M€ pour les deux crues précitées. Pour l'espérance des volumes, le bénéfice lié aux travaux est moins marqué. La diminution sera sensible qu'une fois l'ensemble des trois systèmes sécurisés.

Les travaux réalisés jusqu'à aujourd'hui ont également eu un impact conséquent sur le nombre de personnes inondées puisqu'il est passé de 17 500 à 4 700 pour une crue 11500 et de 43 000 à 10 500 pour une crue 12 500. Après les travaux réalisés dans le cadre du CPIER 2021-2027, les personnes pouvant être potentiellement inondées seront de 580 et 4200 pour les deux crues précitées.

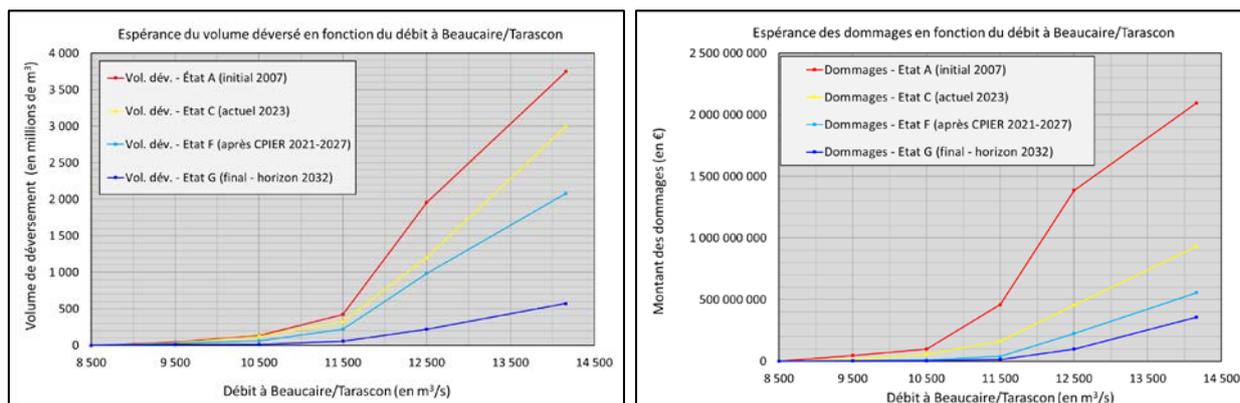


FIGURE 3. Espérance du volume déversé, des dommages et des personnes inondées en fonction du débit du Rhône à Beaucaire/Tarascon (*SYMADREM*)

Efficacité du programme

L'efficacité des travaux du programme de sécurisation est appréciée par le DEMA (Dommages Evités Moyens Annuels) qui correspond aux bénéfices réalisés sur le territoire grâce au projet en tenant compte de tous les événements d'inondation qui peuvent s'y produire (7). Elle est également appréciée au regard du NEMA (Nombre Evité Moyen Annuel d'enjeux protégés) sur le territoire (8).

$$DEMA = DMA \text{ initial} - DMA \text{ après projet (7)}$$

$$NEMA = NMA \text{ initial} - NMA \text{ après projet (8)}$$

L'analyse de sensibilité permet de donner une fourchette de résultats, maximale avec l'ajustement sur les probabilités conditionnelles de brèches après travaux et minimale avec l'ajustement sur les dommages calculés à partir du REX de 2003 par la DREAL AURA en 2008 [5]. Le programme de sécurisation permettra, à horizon 2032, de faire une économie entre 20 et 35 M€ en moyenne par an (DEMA) selon les hypothèses.

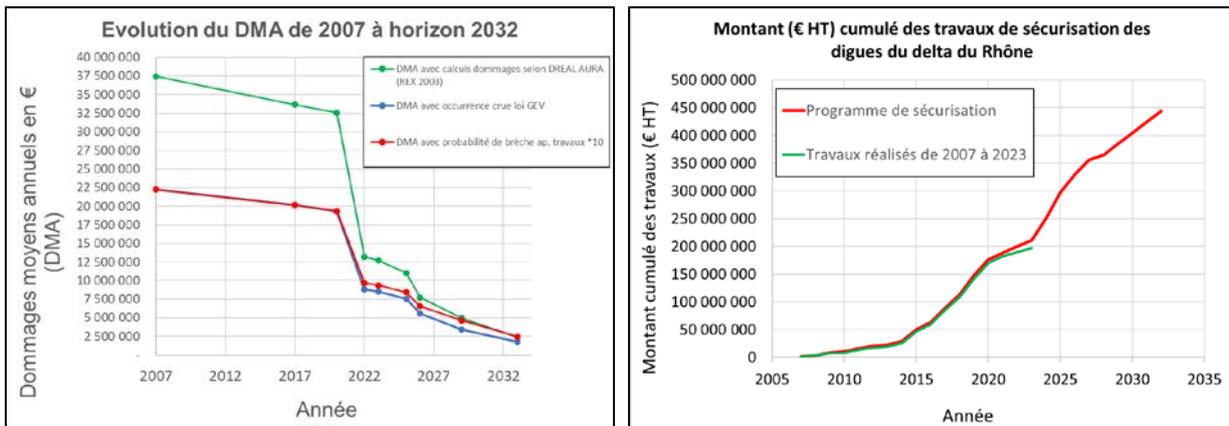


FIGURE 4. Evolution du DMA et analyse de sensibilité, coûts des travaux (SYMADREM)

Efficiace du programme

A partir du DEMA, des coûts du programme de sécurisation et des coûts économisés, les flux économiques générés par ces travaux (bénéfices – coûts) peuvent être calculés. On parle alors de la Valeur Actualisée Nette (VAN). On estime ainsi que la rentabilité du programme de sécurisation sera atteinte entre 30 ans (2037) et 47 ans (2054) après son démarrage. A l'horizon temporel de 50 ans, le projet permettra d'économiser entre 22 et 270 M€ et à l'horizon temporel de 100 ans (durée de vie affichée des digues), entre 320 et 790 M€.

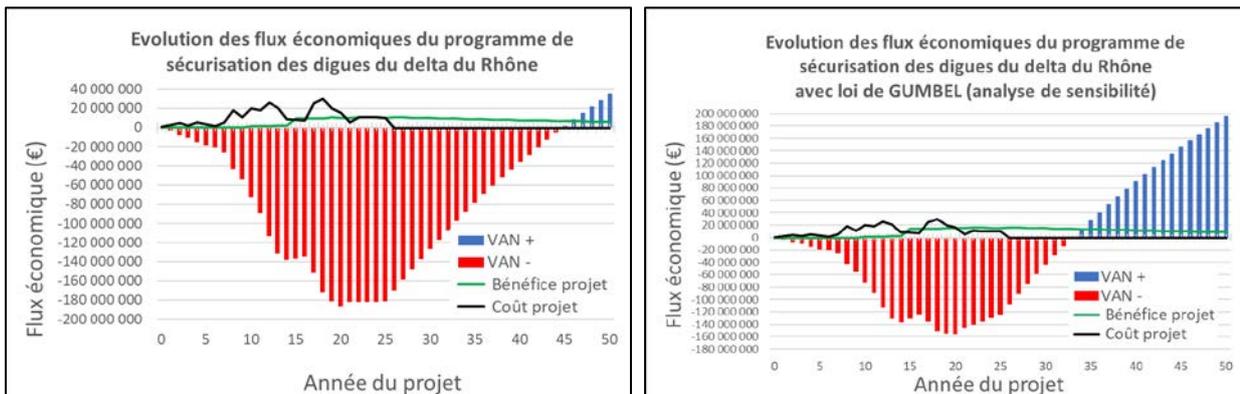


FIGURE 5. Evolution des flux économiques du programme de sécurisation et analyse de sensibilité (SYMADREM)

Conclusion

Les résultats de l'AMC permettent de confirmer la pertinence socio-économique du programme de sécurisation du SYMADREM [9]. L'analyse de sensibilité montre néanmoins une variabilité très importante des résultats pour des hypothèses jugées équiprobables, ce qui nous a conduit à privilégier, pour la restitution des résultats, des plages de valeurs plutôt que des valeurs fixes. Une démarche analogue a été également mise en œuvre dans le cadre de la stratégie littorale en cours de déploiement [4]. Le croisement des deux études permet de voir que les inondations du Rhône restent le principal risque dans le grand delta, mais qu'à l'horizon 2027, compte tenu des travaux à venir sur les digues fluviales et de l'élévation du niveau marin lié au changement climatique, le risque de submersion marine dépassera le risque d'inondation par le fleuve.

Références

- [1] Ang, A.H-S. and W.H. Tang. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Volume II-Decision, Risk and Reliability*, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [2] Chambre d'Agriculture du Gard (janvier 2010). *Etude des Enjeux agricoles, Plaine de Bellegarde/Fourques*
- [3] Commissariat général au développement durable (2018). *Analyse multicritère des projets de prévention des inondations, Guide méthodologique 2018* - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.
- [4] De Paris C., et al., (2024). *Déploiement d'une stratégie littoral de Camargue : diagnostic de territoire et réponses possibles*. 4^{ème} Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations – Aix-en-Provence – INRAE
- [5] DREAL Auvergne Rhône Alpes (2007). *Analyse économique du pré-schéma sud à l'aval de Beaucaire – Assistance technique pour la mise en œuvre de la stratégie de prévention des inondations sur le Rhône et ses affluents (n° 4240589 – R11- v5)*
- [6] DREAL AURA (2018) - *Actualisation de l'hydrologie des crues du Rhône* – Hydro Consultant & Irstea
- [7] Laplace P.S. (1774) : *Mémoire sur la probabilité de causes par les événements*
- [8] Lévêque F. (2013) : *Le risque d'accident nucléaire majeur : calcul et perception des probabilités*. Working Paper 13-ME-02. Interdisciplinary Institute for Innovation.
- [9] Mallet T., (2012). *Programme de sécurisation des ouvrages de protection contre les crues du Rhône du barrage de Vallabrègues à la mer* – SYMADREM.
- [10] Mallet T. et al. (2019) - *Etudes de dangers des systèmes d'endiguement fluviaux dans le delta du Rhône* - 3^{ème} Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations – Aix-en-Provence – IRSTEA
- [11] Mallet T. et al. (2019) - *Accidentologie des digues du delta du Rhône de 1840 à nos jours* -3^{ème} Colloque National sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations – Aix-en-Provence – IRSTEA
- [12] Mallet T. (2024) et al. *Cartographie numérique interactive du risque d'inondation du Rhône – de l'étude de dangers au développement de la culture du risque* – 4^{ème} colloque national sur les digues – Aix-en-Provence - 2024
- [13] Vinet F. & Al. – *La mortalité comme expression de la vulnérabilité humaine face aux catastrophes naturelles : deux inondations récentes en France (Xynthia, Var, 2010)* – VetigO la revue électronique en sciences de l'environnement – volume 11 numéro 2 – 2011