



# Note méthodologique sur l'ACB “ Inondation ” : situation de référence en cas de confortement des digues

F. Grelot

## ► To cite this version:

F. Grelot. Note méthodologique sur l'ACB “ Inondation ” : situation de référence en cas de confortement des digues. irstea. 2018, pp.9. hal-02609403

**HAL Id: hal-02609403**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02609403>**

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.

# Note méthodologique sur l'ACB « Inondation ».

## Situation de référence en cas de confortement des digues

Frédéric Grelot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IRSTEA, UMR G-eau, Montpellier, France

**Résumé.** L'objectif de cette note est de préciser la notion de situation de référence en cas de confortement de digue pour la réalisation d'une analyse coût-bénéfice. Le confortement de digue consiste à rendre une digue plus solide sans modifier l'objectif de protection originel. Pour caractériser la situation de référence, plusieurs options sont envisageables, en fonction des réactions plausibles du gestionnaire de la digue à sa rupture. Les implications sur l'évaluation des bénéfices et des coûts d'une analyse coût-bénéfice sont discutées. Il est également proposé une façon de les calculer dans le cadre dit des « dommages évités ».

**Mots clés.** Inondation, Analyse Coût-Bénéfice, Méthode, Situation de référence, Confortement de digue

**Nota Bene** Le sens précis des termes écrits en italique est donné dans l'appendice A.

### 1 Introduction

L'évaluation d'un projet par une analyse coût-bénéfice (ACB) repose sur la détermination des impacts de ces projets, puis de leur valorisation. Pour estimer ces impacts, il s'agit d'évaluer les différences entre deux situations :

- la situation dite de référence, qui correspond à la situation si le projet n'est pas réalisé ;
- la situation avec projet, qui correspond à la situation si le projet est réalisé.

Appliquée aux projets de prévention des inondations, il est d'usage de considérer que la situation de référence correspond à la situation actuelle, considérée comme représentative de la situation sur tout l'*horizon temporel* choisi (Magnier et al., 2014). Cette hypothèse peut être discutable dans certains cas. L'objectif de cette note est précisément de discuter

de la pertinence de cette hypothèse lorsque le projet consiste en un confortement de digue.

### 2 Cadrage de la problématique

#### 2.1 Confortement de digue

Dans cette note, il est considéré qu'un projet de confortement de digue consiste à renforcer la solidité d'un système cohérent de protection de type digue sans en modifier les principes de fonctionnement. Les effets attendus d'un tel projet sont de limiter les risques de défaillance du système, du fait d'une rupture. Ces risques de défaillance peuvent intervenir de deux façons :

1. une rupture alors qu'un élément de protection n'est pas submergé (plutôt par un mécanisme de type renard hydraulique) ;
2. une rupture lorsqu'un élément de protection est submergé (plutôt par un mécanisme de type érosion régressive).

Dans la suite de la note, dans un souci de simplification, nous allons considérer que le système cohérent de protection est assimilable à une digue. Nous désignerons la zone que ce système est supposé protéger par « périmètre protégé ». Nous allons considérer que les événements de crue à l'origine des inondations peuvent être caractérisés selon leurs périodes de retour. Nous allons désigner par « objectif de protection » l'événement au-delà duquel la digue est submergée. Cet événement a une période de retour qui sera notée  $T_{OP}$ . Nous considérons que les périodes de retour des événements sont telles que pour un événement  $e$  de période de retour  $T$  :

- $T \leq T_{OP} \implies$  la digue n'est pas submergée.
- $T > T_{OP} \implies$  la digue est submergée.

Ces considérations ne sont pas complètement anodines, elles supposent que les périodes de retour soient définies par rapport à une grandeur cohérente avec ce qui fait qu'une digue

est submergée ou non. Nous rappelons d'ailleurs que c'est plutôt la hauteur d'eau atteinte au droit de la digue qui importe pour la submersion et que les périodes de retour sont la plupart du temps définies par rapport au débit maximal instantané. Nous ne nous pencherons pas plus sur ce problème dans la note. Nous signalons juste que ces simplifications sont très utiles pour le calcul des dommages moyens annuels. En effet, dans ce cas, il est possible d'estimer ces dommages moyens annuels à partir d'une collection finie de crues jugées représentatives des événements susceptibles de se produire (voir section 3.1). Une alternative est possible qui consiste à calculer les dommages moyens annuels par le biais d'une simulation de très nombreux événements<sup>1</sup>.

Dans la suite de la note, nous allons également considérer que le projet de confortement, qui ne modifie pas « l'objectif de protection » de la digue, ne modifie pas non plus les conditions dans lesquelles se produisent les inondations dans la zone protégée, que ces inondations interviennent suite à une rupture ou non. Nous considérons donc qu'en cas de rupture, pour la même crue, l'inondation de la zone protégée est identique que la digue soit confortée ou non. De même, nous considérons qu'une crue impliquant une submersion de la digue (donc de période de retour supérieure à  $T_{OP}$ ), produit la même inondation quel que soit le niveau de confortement de la digue. Cette simplification peut être levée sans que cela remette en cause le raisonnement qui suit.

## 2.2 Situation de référence

Dans le cadre d'une ACB, la définition de la situation de référence, de façon générale, est primordiale pour l'estimation des impacts du projet évalué. Il est proposé de considérer que le principe à suivre pour déterminer ce qu'est la situation de référence est de considérer l'évolution la plus plausible du *périmètre* d'étude si le projet n'est pas réalisé.

Dans le cas d'un projet de confortement de digue, la situation actuelle correspond à une situation où l'état de la digue est considéré comme suffisamment dégradé pour qu'il soit considéré qu'il faille intervenir. En partant de cette situation actuelle, il est légitime de considérer plusieurs possibilités pour l'évolution du *périmètre* d'étude si le projet n'est pas réalisé.

**Situation actuelle** Considérer que la situation de référence correspond à la situation actuelle tout au long de l'*horizon temporel* correspond à l'hypothèse que la fragilité de la digue va rester la même tout au long de cette période. Cela consiste donc à considérer que cette fragilité ne sera pas remise en cause même en cas de rupture de la digue. Dans cette situation, si une inondation intervient suite à une rupture de la digue, celle-ci sera donc réparée mais sans en améliorer la solidité.

1. Cette question particulière fera l'objet d'une prochaine note méthodologique.

**Confortement suite à une rupture** Dans ce cas de figure, il est considéré que, dès lors qu'une rupture interviendra sur la digue, les réparations seront faites de telle façon que les fragilités de la digue seront traitées. Il pourrait être envisagé que ces réparations n'impliquent pas la même solidité que celle visée par le projet de confortement, mais ce n'est pas ce que nous allons considérer dans la suite de la note. En partant du constat que lorsqu'une rupture de digue a lieu (exemple de Fourques-Baucaire, d'Aramon...), les réparations de la digue donnent très souvent lieu à une reprise généralisée de la digue, nous considérerons que, suite à une rupture, la situation de la digue sera équivalente à celle après le projet de confortement de la digue. Ceci implique également que des investissements seront nécessaires : nous considérons qu'ils sont identiques à ceux qui sont avancés dans le projet de confortement, ce qui revient à négliger des éventuels surcoûts ou au contraire économies du fait de la réalisation du projet suite à la rupture.

**Effacement de la digue** Dans ce cas de figure, il est considéré que, dès lors qu'une rupture interviendra sur la digue, la digue ne sera plus réparée. Le territoire jusqu'alors protégé par la digue ne le sera plus du tout. Il paraît réaliste dans ce cas de figure de considérer que les enjeux, au moins les plus importants, jusqu'alors protégés par la digue soit relocalisés dans une partie du territoire moins exposée. Dans la nouvelle situation suite à une rupture, les conditions d'inondation du territoire ne sont plus influencées par l'ouvrage réputé transparent. La modification de la présence des enjeux implique que, pour une même inondation dans le périmètre protégé, les dommages sont diminués. D'un point de vue *coût*, des investissements seront nécessaires pour éventuellement intervenir sur l'ouvrage (peut-être qu'il ne peut pas être laissé en l'état), mais également pour relocaliser certains enjeux, voire en adapter d'autres. L'estimation de ces investissements n'est pas aisée, ce qui peut justifier de préférer considérer comme situation de référence le *confortement suite à une rupture*. Toutefois cette situation ne peut être complètement écartée : c'est ce qui passera dans les zones noires suite à Xynthia.

## 3 Méthodologie de calcul

### 3.1 Description de l'aléa

**Aléa hydrologique** Nous supposons que l'ensemble des crues susceptibles de se produire au droit d'une digue est représenté par une collection finie d'événements considérés comme représentatifs de l'ensemble des événements possibles. Il est d'usage de caractériser ces événements par leur période de retour, en considérant le même élément d'intensité (souvent le débit de pointe). Pour la suite du document nous utilisons les notations suivantes :

- $N$  éléments sont considérés.
- Les événements sont notés  $e_i$  avec  $i \in [1 .. N]$ .

- L'événement  $e_i$  a une période de retour  $T_i$ .
- Les événements sont classés par périodes de retours croissantes, i.e.  $i < j \implies T_i < T_j$ .
- L'événement  $e_1$  correspond à la crue des premiers dommages, c'est-à-dire que tout événement de période de retour  $T \leq T_1$  ne produit pas de dommage, que la digue soit défaillante ou non.
- L'événement  $e_N$  correspond à la pire crue envisageable, c'est-à-dire que tout événement de période de retour  $T > T_N$  produit des dommages égaux (équivalents) à ceux de l'événement  $e_N$ .

**Aléa de rupture** Lorsque l'événement  $e_i$  se produit une rupture est susceptible de se produire. Nous représentons cette possibilité par le biais d'une probabilité de rupture notée  $r_i$ . La rupture dépend donc de l'intensité des événements.

Elle dépend également de l'état de la digue. En notant la situation d'origine  $S_O$  et la situation avec confortement  $S_C$ , nous posons donc que pour chaque événement  $e_i$  le risque de rupture est  $r_{i,O}$  (respectivement  $r_{i,C}$ ) en situation  $S_O$  (respectivement  $S_C$ ).

**Remarque** La qualification des probabilités  $r_i$  n'est pas aisée, quelle que soit la situation (confortée ou non). Les retours d'expérience existants sur les cas de rupture ne permettent pas d'établir des statistiques sur ces ruptures. Peut-être est-ce envisageable à long terme, mais cela ne semble pas possible à l'heure actuelle. La pratique est de qualifier ces probabilités à dire d'expert, la valeur des  $r_i$  ayant un sens en terme d'ordre de grandeur. Une autre difficulté est de connaître l'état de la digue.

### 3.2 Description des dommages

Les dommages générés pour l'événement  $e_i$  dépendent de la défaillance ou non de la digue. En cas de défaillance (rupture de la digue), ces dommages seront notés  $DR_i$ , en cas de non rupture  $DN_i$ .

Lorsque l'événement  $e_i$  a lieu (ou tout événement représenté par  $e_i$ ), il se produit donc en moyenne le dommage :

$$D_i = r_i DR_i + (1 - r_i) DN_i$$

**Remarque** Comme nous l'avons précisé dans la section 2.1, les digues sont construites avec un objectif de protection, qui est souvent caractérisé par un événement de débit donné. En simplifiant, les digues sont supposées protéger complètement le périmètre jusqu'à un événement de période de retour  $T_{OP}$ . Pour tous les événements de période de retour  $T \leq T_{OP}$ , s'il n'y a pas rupture, il n'y a pas de dommage dans la zone protégée. Donc, pour tous les événements  $e_i$ ,  $T_i \leq T_{OP} \implies DN_i = 0$ .

**Remarque** L'événement  $e_1$  ne produit pas de dommage quel que soit l'état de la digue, qu'il y ait rupture ou non, qu'elle soit présente ou non.

### 3.3 Représentation alternative de la situation

En posant  $f_i = \frac{1}{T_i}$ , le calcul classiquement utilisé pour calculer les dommages moyens annualisés revient à considérer que les événements  $e_i$  peuvent se produire chaque année avec la probabilité (voir annexe B pour une démonstration) :

- $p_1 = 1 - \frac{f_1 + f_2}{2}$ , pour  $i = 1$ .
- $p_i = \frac{f_{i-1} - f_{i+1}}{2}$ , pour  $i \in [2 .. N - 1]$ .
- $p_N = \frac{f_N + f_{N-1}}{2}$ , pour  $i = N$ .

Ces probabilités sont telles que  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ .

Avec cette représentation, en tenant compte du risque de rupture, chaque année, les dommages moyens sont donc :

$$D = \sum_{i=1}^N p_i r_i DR_i + \sum_{i=1}^N p_i (1 - r_i) DN_i$$

En posant :

- $q = \sum_{i=1}^N p_i (1 - r_i)$
- $DR = \frac{1}{1-q} \sum_{i=1}^N p_i r_i DR_i$
- $DN = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^N p_i (1 - r_i) DN_i$

la situation peut donc être présentée de la façon simplifiée suivante :

- chaque année la digue a une probabilité de rupture de  $(1 - q)$ , une probabilité de non rupture de  $q$  ;
- en cas de rupture les dommages occasionnés sont  $DR$  ;
- en cas de non rupture les dommages occasionnés sont  $DN$  ;
- les dommages moyens annuels sont  $D = (1 - q)DR + qDN$ .

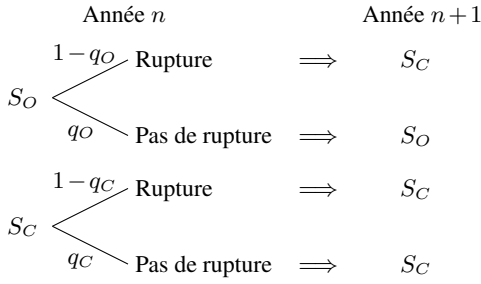
### 3.4 Impacts du projet

**Confortement de la digue** Le confortement de la digue a pour effet de modifier les probabilités de défaillance de la digue. En gardant les notations  $S_O$  pour la situation d'origine et  $S_C$  pour la situation avec confortement, la réalisation du projet de confortement revient donc à passer d'une situation où :

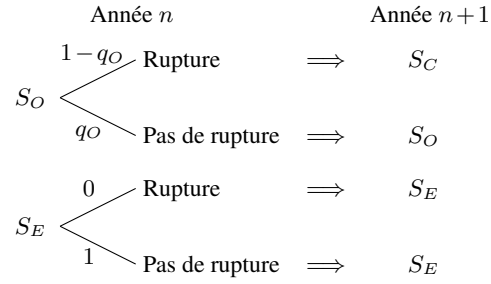
- pour chaque événement  $e_i$  le risque de rupture passe de  $r_{i,O}$  à  $r_{i,C}$  ;
- toutes les autres caractéristiques ( $p_i$ ,  $DN_i$ ,  $DR_i$ ) restent inchangées.

En situation actuelle, la probabilité de rupture de la digue est  $1 - q_O = \sum_{i=1}^N p_i r_{i,O}$ . Les dommages moyens annuels sont  $D_O = (1 - q_O)DR_O + q_O DN_O$ .

En situation avec confortement, la probabilité de rupture de la digue est  $1 - q_C = \sum_{i=1}^N p_i r_{i,C}$ . Les dommages moyens annuels sont  $D_C = (1 - q_C)DR_C + q_C DN_C$ .



**FIGURE 1.** Transition entre les différents états de la digue pour le confortement après rupture



**FIGURE 2.** Transition entre les différents états de la digue pour l'effacement de la digue

**Effacement de la digue** L'effacement de digue, s'il s'accompagne d'une relocalisation des enjeux jusqu'alors protégés, a un double effet :

- la digue n'étant plus présente, le risque de rupture disparaît ;
- les enjeux jusqu'alors protégés (ou une partie d'entre eux) étant relocalisés, les dommages attendus pour chaque événement sont modifiés.

Avec le formalisme précédent, en notant toujours la situation d'origine  $S_O$ , on peut décrire la situation avec effacement (notée  $S_E$ ) de la façons suivante :

- pour chaque événement  $e_i$ , le risque de rupture passe de  $r_{i,O}$  à 0
- pour chaque événement  $e_i$ , les dommages en cas de non rupture passe de  $DN_{i,O}$  à  $DN_{i,E}$
- les probabilités  $p_i$  restent inchangées
- les dommages  $DR_{i,f}$  n'ont pas besoin d'être spécifiés.

En situation avec effacement, les dommages moyens annuels sont  $D_E = DN_E = \sum_1^N p_i DN_{i,E}$ .

### 3.5 Flux des dommages selon les situations de référence

Le flux des dommages au cours de l'*horizon temporel* dépend de la situation de référence choisie.

**Situation actuelle** Dans ce cas, les dommages en situation de référence sont constants et égaux à  $D_O$ .

**Confortement suite à une rupture** Dans ce cas si une rupture intervient alors que la digue n'est pas confortée (en situation  $S_O$ ), cette digue sera réparée et passera à la situation  $S_C$ . Si une rupture de la digue intervient en situation confortée, la digue sera réparée et restera en situation confortée. Il est supposé que ces coûts de réparation sont intégrés dans les coûts  $DR$  et qu'ils sont identiques quelle que soit la situation de la digue.

Le passage entre les deux situations d'une année sur l'autre peut être représenté par le schéma de la figure 1. L'évolution de cet état de la digue peut être représentée par

un processus de Markov de matrice de transition des états

$$M = \begin{pmatrix} q_O & 1 - q_O \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Il est aisé de remarquer que  $M^i = \begin{pmatrix} q_O^i & 1 - q_O^i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

En partant, en année 0, de la situation actuelle où la digue n'est pas confortée (en situation  $S_C$ ), à l'année  $k$ , la digue se trouve donc :

- en situation  $S_O$  avec la probabilité  $q_O^k$
- en situation  $S_C$  avec la probabilité  $1 - q_O^k$

Les dommages espérés en année  $k$  sont donc :

$$q_O^k D_O + (1 - q_O^k) D_C$$

**Effacement de la digue** L'état de la digue suit une évolution équivalente à celle du confortement après rupture (voir figure 2). Il est également représenté par un processus de Markov, avec la même matrice de transition  $M$ . Cette matrice donne les transitions entre la situation  $S_O$  où la digue n'est pas confortée et la situation  $S_E$  où la digue est effacée.

En partant de la situation actuelle en année 0 où la digue n'est pas confortée (en situation  $S_O$ ), à l'année  $k$ , la digue se trouve donc :

- en situation  $S_O$  avec la probabilité  $q_O^k$
- en situation  $S_E$  avec la probabilité  $1 - q_O^k$

Les dommages espérés en année  $k$  sont donc :

$$q_O^k D_O + (1 - q_O^k) D_E$$

### 3.6 Flux des investissements selon les situations de référence

Selon la situation de référence retenue, les flux des investissements vont également varier. Cela est particulièrement important à préciser lorsque la situation de référence choisie est le confortement suite à une rupture ou l'effacement de la digue.

**Situation actuelle** Dans ce cas, aucun investissement particulier n'est programmé. Le flux d'investissements est donc constant et égal à 0.

**Confortement suite à une rupture** Dans ce cas, une rupture de la digue implique une modification de son état et donc un investissement pour la collectivité. Il est supposé que cet investissement est égal au coût d'investissement prévu pour le projet de confortement, noté  $CI$  et qu'il a intégralement lieu l'année de la rupture.

Pour établir le flux des investissements tout au long de l'*horizon temporel*, il s'agit également de préciser la probabilité de passer de l'état  $S_O$  à l'état  $S_C$  chaque année. Pour l'année  $k$ , l'investissement sera nécessaire si on se trouve en situation non confortée ( $p = q_O^k$ ) et qu'une rupture intervient ( $p = 1 - q_O$ ). Donc, la probabilité de passer de la situation  $S_O$  à la situation  $S_C$  en l'année  $k$  est donnée par la formule  $q_O^k(1 - q_O)$

Les investissements en année  $k$  sont donnés par :

$$q_O^k(1 - q_O)CI$$

**Effacement de la digue** En notant  $CI_E$  les coûts d'investissement nécessaires à l'*effacement de la digue* et à la délocalisation des enjeux, un raisonnement similaire donne que les investissements en année  $k$  sont donnés par :

$$q_O^k(1 - q_O)CI_E$$

**Remarque** Le coût d'investissement en cas de délocalisation n'est pas aisé à calculer. Le présenter de la sorte est un abus de langage qui peut induire une mauvaise interprétation de ce qu'il faut considérer. Il s'agit ici de mesurer le coût d'opportunité pour la collectivité de la délocalisation des enjeux en tenant bien compte de tous les transferts qu'elle induit. En considérant que les enjeux sont effectivement délocalisés (et non pas supprimés), qu'ils seront équivalents avant et après la délocalisation, ces coûts sont égaux aux efforts consentis pour « effacer » les anciennes infrastructures et « construire » les nouvelles. Ceci n'est qu'un proxy de la valeur qu'il s'agirait théoriquement de prendre, qui ne tient pas compte de la possible offre non exploitée d'infrastructures en dehors du périmètre protégé, ni des éventuels nouveaux usages de l'espace libéré par la délocalisation.

**Remarque** La présentation pour les coûts d'investissements suppose que tout sera réalisé l'année de la rupture de la digue. C'est déjà peu probable pour le *confortement suite à une rupture*, ça l'est encore moins pour l'*effacement de la digue*.

### 3.7 Flux des coûts d'entretien selon les situations de référence

En remarquant que les coûts d'entretien de l'ouvrage disparaissent si celui-ci est effacé (situation  $S_E$ ), à l'instar des

investissements, selon la situation de référence retenue, les flux des coûts d'entretien vont également varier.

**Situation actuelle** Dans ce cas, il est d'usage de poser que les coûts d'entretien sont constants sur tout l'*horizon temporel*. Nous les noterons  $CE_O$ , ils représentent le coût d'entretien si la digue n'est pas confortée.

**Confortement suite à une rupture** En cas de confortement de la digue, il est légitime de considérer que les coûts d'entretien vont diminuer. Nous les noterons  $CE_C$ . Un raisonnement similaire à celui pour les dommages montre que les coûts d'entretien en année  $k$  sont donnés par :

$$q_O^k CE_O + (1 - q_O^k) CE_C$$

**Remarque** Si  $CE_C = CE_O$  cette formule redonne les coûts d'entretien de la situation actuelle, constants dans le temps à la valeur  $CE_O$ .

**Effacement de la digue** En cas d'effacement de la digue, il est légitime de considérer que les coûts d'entretien vont être négligeables. Nous les prendrons nuls. Un raisonnement similaire à celui pour les dommages montre que les coûts d'entretien en année  $k$  sont donnés par :

$$q_O^k CE_O$$

## 4 Exemple d'application

Pour illustrer cette note, nous présentons dans cette section un exemple d'application. Il s'inspire du projet de confortement de la digue de Fourques-Beaucaire (ISL, 2010).

### 4.1 Description de la situation

Dans le projet originel 5 événements sont considérés. À ceux-ci, nous avons ajouté un événement pour la crue dite des premiers dommages qui puisse avoir une signification pour la situation *effacement de la digue*. Les 6 événements retenus sont présentés dans le tableau 1.

Nous n'avons pas conservé tous les raffinements de l'étude originelle pour le calcul des dommages. Dans celle-ci, il était distingué trois scénarios équiprobables de la localisation de la brèche, ainsi que deux saisons d'occurrence. Ainsi, pour chaque événement il y avait deux scénarios de dommage lorsque la digue était submergée sans rompre, 6 scénarios de dommages lorsque la digue rompait. Nous avons simplifié le problème en considérant, pour chaque scénario de crue, un scénario de dommage moyen pour le cas de submersion sans rupture et un scénario de dommage moyen pour le cas

**TABLE 1.** Caractéristiques des événements

| Événement | $T$  | $T_{min}$ | $T_{max}$ | $p$    | $r_O$  | $r_C$  | $DN_O$ | $DR_O$ | $DN_E$ |
|-----------|------|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $e_1$     | 5    | 1         | 10        | 0,9000 | 0,0000 | 0,0000 | 0      | 0      | 0      |
| <11500    | 15   | 10        | 50        | 0,0800 | 0,0001 | 0,0000 | 0      | 50     | 0      |
| 11500     | 85   | 50        | 150       | 0,0133 | 0,1000 | 0,0000 | 0      | 170    | 10     |
| 12500     | 215  | 150       | 500       | 0,0047 | 1,0000 | 0,0001 | 53     | 312    | 50     |
| 14160     | 785  | 500       | 2000      | 0,0015 | 1,0000 | 0,0010 | 170    | 393    | 100    |
| >14160    | 3215 | 2000      | $+\infty$ | 0,0005 | 1,0000 | 0,0010 | 500    | 600    | 200    |
| Unités    | ans  | ans       | ans       |        |        |        | M€     | M€     | M€     |

de rupture. Ces dommages moyens ont été calculés en nous appuyant sur les probabilités proposées dans l'étude.

#### 4.2 Coûts d'investissement et d'entretien

**TABLE 2.** Coût des projets (M€)

| Type                   | Montant |
|------------------------|---------|
| Coûts de confortement  | 40,0    |
| Coûts d'effacement     | 100,0   |
| Entretien original     | 2,0     |
| Entretien confortement | 1,2     |
| Entretien effacement   | 0,0     |
| Unités                 | M€      |

Le tableau 2 présente les différents coûts nécessaires pour l'analyse. Quand cela est possible ces coûts sont issus de l'étude originelle. Le coût de confortement de la digue correspond notamment au coût annoncé dans le projet.

Dans l'étude originelle, les coûts d'entretien en situation initiale et en situation avec confortement ont été pris égaux. Nous proposons ici de les différencier. Pour le coût d'entretien de la digue confortée nous avons pris le taux d'entretien minimal (3 %) proposé dans le guide méthodologique du MEDDE (Magnier et al., 2014) appliqué à l'investissement nécessaire pour le confortement. Pour le coût d'entretien de la digue non confortée nous avons pris le taux maximal (5 %) également appliqué à l'investissement nécessaire au confortement.

Le coût de l'effacement de la digue est complètement hypothétique.

#### 4.3 Dommages

**TABLE 3.** Dommage (M€)

| Situation    | $1 - q$  | $DN$ | $DR$   | $D$  |
|--------------|----------|------|--------|------|
| Initiale     | 0,008    | 0,00 | 321,25 | 2,57 |
| Confortement | 2,47E-06 | 0,75 | 419,64 | 0,75 |
| Effacement   | 0        | 0,62 | 0      | 0,62 |
| Unités       | ans      | M€   | M€     | M€   |

Dans le tableau 3 sont présentées plusieurs choses. La colonne  $1 - q$  donne le risque de rupture annuel pour les différentes situations de la digue. Il est nul en cas d'effacement de digue, très très faible en cas de confortement, faible dans la situation actuelle. Il présente également les valeurs à retenir pour le dommage *moyen* en cas de rupture (colonne  $DR$ ) et en cas de non rupture (colonne  $DN$ ) pour pouvoir retrouver le dommage moyen annuel dans chaque situation (colonne  $D$ ). L'interprétation des colonnes  $DN$  et  $DR$  n'est pas directe. Ainsi, le dommage à retenir en cas de non rupture en situation non confortée est nul, car la non rupture de la digue ne peut intervenir que lorsque le dommage de non rupture est nul (pour les événements < 11500 et 11500, voir le tableau 1). Au contraire il est non nul pour la situation confortée car la non rupture de la digue intervient également pour des événements plus intenses qui génèrent des dommages même si la digue ne rompt pas.

#### 4.4 Transition entre les états

**TABLE 4.** Matrice de transition

|       | $S_O$ | $S_C$ |
|-------|-------|-------|
| $S_O$ | 0,992 | 0,008 |
| $S_C$ | 0     | 1     |

Le tableau 4 présente les valeurs calculées pour les transitions entre les situations de la digue pour la situation de référence.

#### 4.5 Analyse

Enfin, le tableau 5 présente le bilan de l'analyse. Dans ce tableau la colonne « Dommage » donne la somme actualisée des dommages attendus sur l'*horizon temporel* pour quatre différentes situations : la situation de référence dite actuelle, la situation de référence avec confortement après rupture, la situation de référence avec effacement après rupture et la situation de projet.

La colonne « Investissement » donne la somme actualisée des investissements attendus pour chacune de ces situations. Ces investissements ne sont nuls que pour la situation de référence dite actuelle, puisqu'aucun projet n'est attendu dans

**TABLE 5.** Bilan de l'analyse (M€)

|              | Domage | Investissement | Entretien | Bénéfice | Coût  | VAN   |
|--------------|--------|----------------|-----------|----------|-------|-------|
| Initiale     | 75,54  | 0,00           | 58,72     | 51,61    | 16,51 | 35,10 |
| Confortement | 67,97  | 7,82           | 55,40     | 44,04    | 12,02 | 32,02 |
| Effacement   | 67,40  | 19,54          | 50,41     | 43,48    | 5,29  | 38,19 |
| Projet       | 23,92  | 40,00          | 35,23     | –        | –     | –     |
| Unités       | M€     | M€             | M€        | M€       | M€    | M€    |

ce cas. Par contre, ils ne sont pas nuls dans les cas de la situation de référence avec confortement après rupture ni celle avec effacement après rupture puisque des investissements seront nécessaires en cas de rupture. Il n'a pas été considéré qu'il y avait un coût d'opportunité (ni positif ni négatif) à conforter la digue suite à une rupture, c'est le même investissement que celui de projet.

La colonne « Entretien » donne la somme actualisée des coûts d'entretien de la digue dans les différentes situations. Les valeurs sont les plus élevées pour la digue non confortée.

Chacune de ces trois colonnes correspond à la somme actualisée des colonnes correspondantes présentées dans le tableau C1 de l'annexe C.

Pour les trois situations de référence analysées, la colonne « Bénéfice » présente ce qui est classiquement attendu d'une ACB basée sur les dommages évités : la différence entre les dommages dans la situation de référence et ceux dans la situation du projet. Dans la colonne « Coût », les montants proposés diffèrent de ce qui est classiquement mis dans une ACB basée sur les dommages évités. Les coûts du projet ont été corrigés du différentiels attendus dans chacune des situations de référence.

Avec  $CI_P$  et  $CE_P$  désignant les coûts actualisés d'investissement et d'entretien du projet,  $CI_S$  et  $CE_S$  ceux attendus dans la situation de référence  $S$ , la valeur de la colonne « Coût » pour la situation  $S$  est donnée par la formule :

$$CI_P - CI_S + CE_P - CE_S$$

La colonne « VAN » donne le bilan entre les bénéfices et les coûts pour chacune des situations de référence. En prenant comme base la situation de référence *initiale*, nous constatons que les écarts sont de l'ordre de 10 %. Ces valeurs sont clairement dépendantes de chacun des projets analysés.

L'exemple présenté montre que les valeurs de la VAN varient de façon notable selon la situation de référence choisie. Sur cet exemple, la variation de la VAN ne modifie pas l'analyse de la pertinence du projet : dans tous les cas, le confortement est efficient. Il est difficile d'établir sur cet exemple des préconisations génériques pour telle ou telle situation de référence. Toutefois l'exemple choisi montre que ce choix a une importance significative sur l'estimation quantitative de la VAN, qui mérite un positionnement explicite du porteur de projet quant à la situation de référence choisie pour pouvoir pleinement interpréter les résultats. Cette explicitation est

d'autant plus importante dans une logique de comparaison de projets sur des territoires différents, notamment dans le cas où le choix de la situation de référence serait laissé au porteur de projet. Enfin, le choix de la situation de référence, parce qu'il a des implications sur la valeur de la VAN, doit s'appuyer sur des justifications, notamment de la plausibilité de la situation de référence choisie.

*Remerciements.* Cette note a été rédigée dans le cadre des travaux du groupe de travail AMC piloté par le MTES, conjointement par la DGPR et le CGDD. Elle a bénéficié d'une relecture attentive de Pauline Brémond, Katrin Erdlenbruch, Sébastien Loubier, Delphine Rouchon et Claire Richert.

## Références

ISL : Étude du renforcement de la digue du Rhône rive droite entre Beaucaire et Frupture. Rapport de phases 11 et 12 : étude de vulnérabilité et de dommages, Tech. Rep. Rapport définitif du 25 janvier 2010 version G, Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer, 2010.

Magnier, C., Christin, N., and Peinturier, C. : Analyse multicritères des projets de prévention des inondations. Guide méthodologique, Références, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Commissariat général au développement durable, Paris, France, 86 pages, 2014.

## Annexe A Notions clés de l'ACB utilisées dans la note

*Bénéfice.* Dans une ACB, les bénéfices correspondent aux impacts positifs du projet. Dans le cadre d'une ACB basée sur les dommages évités, les bénéfices attendus de la modification des conditions d'inondation sont estimés par le biais de la différence entre les dommages dans la situation de référence et ceux de la situation avec projet. Si cette différence est négative, les dommages « ajoutés » sont à classer dans les coûts du projet. Cela peut être le cas sur certaines parties du territoire, pour certains enjeux.



**Coût.** Dans une ACB, les coûts correspondent aux impacts négatifs du projet. Sont considérés a minima dans cette catégorie tous les efforts nécessaires pour l'implémentation du projet (coût d'investissement et coût d'entretien).

**Périmètre.** Il correspond techniquement à l'étendue spatiale retenue pour faire l'inventaire de tous les impacts (positifs comme négatifs) pris en compte dans l'ACB. Dans le cadre d'une ACB basée sur les dommages évités le périmètre correspond très souvent à l'étendue spatiale de l'enveloppe de tous les scénarios d'inondation pris en compte, ce qui revient à négliger les effets indirects des inondations (ou à considérer qu'ils sont supportés par des enjeux directement touchés).

**Horizon temporel.** Il correspond techniquement à la durée sur laquelle les flux de bénéfices et de coûts sont pris en compte pour le calcul de la VAN.

**VAN.** La valeur actuelle nette est la différence entre la somme des bénéfices actualisés et des coûts actualisés. Elle est l'indicateur de l'efficience du projet évalué.

## Annexe B Démonstration de la représentation alternative de la situation

En reprenant les notations de la section 3.1, en considérant que chaque événement  $e_i$  génère de façon certaine un dommage  $D_i$ , en estimant les dommages moyens annualisés  $D$  d'une telle situation comme l'aire sous la courbe obtenue par extrapolation linéaire entre les points de coordonnées  $(\frac{1}{T_i}, D_i)$ , en notant  $f_i = \frac{1}{T_i}$  on arrive à l'équation suivante :

$$D = (f_1 - f_2) \frac{D_1 + D_2}{2} + \dots + (f_i - f_{i+1}) \frac{D_i + D_{i+1}}{2} + \dots + (f_{N-1} - f_N) \frac{D_{N-1} + D_N}{2} + f_N D_N$$

Cette équation peut se réécrire de la façon suivante :

$$D = \frac{f_1 - f_2}{2} D_1 + \frac{f_1 - f_3}{2} D_2 + \dots + \frac{f_{i-1} - f_{i+1}}{2} D_i + \dots + \frac{f_{N-2} - f_N}{2} D_{N-1} + \frac{f_{N-1} + f_N}{2} D_N$$

En notant que  $D_1 = 0$  (par définition) on peut finalement écrire :

$$D = (1 - \frac{f_1 + f_2}{2}) D_1 + \frac{f_1 - f_3}{2} D_2 + \dots + \frac{f_{i-1} - f_{i+1}}{2} D_i + \dots + \frac{f_{N-2} - f_N}{2} D_{N-1} + \frac{f_{N-1} + f_N}{2} D_N$$

## Annexe C Détail des flux

Le tableau C1 donne sur l'*horizon temporel* le détail des flux de dommages, de coûts d'investissements, de coûts d'entretien pour les 3 situations de référence analysées, ainsi que pour la situation avec projet. La colonne « Act. » donne le taux à appliquer à ces valeurs pour les ramener en valeur à l'année 0. La colonne « Prob. » donne la probabilité de se trouver en situation non confortée ( $q_O^k$  pour l'année  $k$ ).

**TABLE C1.** Flux non actualisés sur la durée de l'horizon temporel

| Année  | Domage |       |      |       |      | Investissement |       |      | Entretien |       |      | Projet |      |      |
|--------|--------|-------|------|-------|------|----------------|-------|------|-----------|-------|------|--------|------|------|
|        | Act.   | Prob. | Ori. | Conf. | Eff. | Ori.           | Conf. | Eff. | Ori.      | Conf. | Eff. | Dom.   | Inv. | Ent. |
| 0      | 1,00   | 1,00  | 2,62 | 2,62  | 2,62 | 0,0            | 0,0   | 0,0  | 2,0       | 2,00  | 2,00 | 2,62   | 40,0 | 1,2  |
| 1      | 0,98   | 0,99  | 2,62 | 2,61  | 2,61 | 0,0            | 0,32  | 0,81 | 2,0       | 1,99  | 1,98 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 2      | 0,95   | 0,98  | 2,62 | 2,59  | 2,59 | 0,0            | 0,32  | 0,80 | 2,0       | 1,99  | 1,97 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 3      | 0,93   | 0,98  | 2,62 | 2,58  | 2,58 | 0,0            | 0,32  | 0,80 | 2,0       | 1,98  | 1,95 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 4      | 0,91   | 0,97  | 2,62 | 2,57  | 2,56 | 0,0            | 0,32  | 0,79 | 2,0       | 1,97  | 1,94 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 5      | 0,88   | 0,96  | 2,62 | 2,55  | 2,55 | 0,0            | 0,31  | 0,78 | 2,0       | 1,97  | 1,92 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 6      | 0,86   | 0,95  | 2,62 | 2,54  | 2,53 | 0,0            | 0,31  | 0,78 | 2,0       | 1,96  | 1,90 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 7      | 0,84   | 0,94  | 2,62 | 2,52  | 2,51 | 0,0            | 0,31  | 0,77 | 2,0       | 1,96  | 1,89 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 8      | 0,82   | 0,94  | 2,62 | 2,51  | 2,50 | 0,0            | 0,31  | 0,77 | 2,0       | 1,95  | 1,87 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 9      | 0,80   | 0,93  | 2,62 | 2,49  | 2,48 | 0,0            | 0,30  | 0,76 | 2,0       | 1,94  | 1,86 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 10     | 0,78   | 0,92  | 2,62 | 2,48  | 2,47 | 0,0            | 0,30  | 0,75 | 2,0       | 1,94  | 1,84 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 11     | 0,76   | 0,91  | 2,62 | 2,47  | 2,45 | 0,0            | 0,30  | 0,75 | 2,0       | 1,93  | 1,83 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 12     | 0,74   | 0,91  | 2,62 | 2,45  | 2,44 | 0,0            | 0,30  | 0,74 | 2,0       | 1,92  | 1,81 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 13     | 0,73   | 0,90  | 2,62 | 2,44  | 2,42 | 0,0            | 0,29  | 0,73 | 2,0       | 1,92  | 1,80 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 14     | 0,71   | 0,89  | 2,62 | 2,43  | 2,41 | 0,0            | 0,29  | 0,73 | 2,0       | 1,91  | 1,78 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 15     | 0,69   | 0,88  | 2,62 | 2,41  | 2,40 | 0,0            | 0,29  | 0,72 | 2,0       | 1,91  | 1,77 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 16     | 0,67   | 0,88  | 2,62 | 2,40  | 2,38 | 0,0            | 0,29  | 0,72 | 2,0       | 1,90  | 1,75 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 17     | 0,66   | 0,87  | 2,62 | 2,39  | 2,37 | 0,0            | 0,28  | 0,71 | 2,0       | 1,90  | 1,74 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 18     | 0,64   | 0,86  | 2,62 | 2,37  | 2,35 | 0,0            | 0,28  | 0,71 | 2,0       | 1,89  | 1,73 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 19     | 0,63   | 0,86  | 2,62 | 2,36  | 2,34 | 0,0            | 0,28  | 0,70 | 2,0       | 1,88  | 1,71 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 20     | 0,61   | 0,85  | 2,62 | 2,35  | 2,33 | 0,0            | 0,28  | 0,69 | 2,0       | 1,88  | 1,70 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 21     | 0,60   | 0,84  | 2,62 | 2,33  | 2,31 | 0,0            | 0,28  | 0,69 | 2,0       | 1,87  | 1,68 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 22     | 0,58   | 0,83  | 2,62 | 2,32  | 2,30 | 0,0            | 0,27  | 0,68 | 2,0       | 1,87  | 1,67 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 23     | 0,57   | 0,83  | 2,62 | 2,31  | 2,28 | 0,0            | 0,27  | 0,68 | 2,0       | 1,86  | 1,66 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 24     | 0,55   | 0,82  | 2,62 | 2,30  | 2,27 | 0,0            | 0,27  | 0,67 | 2,0       | 1,86  | 1,64 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 25     | 0,54   | 0,81  | 2,62 | 2,28  | 2,26 | 0,0            | 0,27  | 0,67 | 2,0       | 1,85  | 1,63 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 26     | 0,53   | 0,81  | 2,62 | 2,27  | 2,24 | 0,0            | 0,26  | 0,66 | 2,0       | 1,85  | 1,62 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 27     | 0,51   | 0,80  | 2,62 | 2,26  | 2,23 | 0,0            | 0,26  | 0,66 | 2,0       | 1,84  | 1,60 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 28     | 0,50   | 0,79  | 2,62 | 2,25  | 2,22 | 0,0            | 0,26  | 0,65 | 2,0       | 1,84  | 1,59 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 29     | 0,49   | 0,79  | 2,62 | 2,24  | 2,21 | 0,0            | 0,26  | 0,64 | 2,0       | 1,83  | 1,58 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 30     | 0,48   | 0,78  | 2,62 | 2,22  | 2,19 | 0,0            | 0,26  | 0,64 | 2,0       | 1,83  | 1,56 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 31     | 0,47   | 0,78  | 2,62 | 2,21  | 2,18 | 0,0            | 0,25  | 0,63 | 2,0       | 1,82  | 1,55 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 32     | 0,45   | 0,77  | 2,62 | 2,20  | 2,17 | 0,0            | 0,25  | 0,63 | 2,0       | 1,82  | 1,54 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 33     | 0,44   | 0,76  | 2,62 | 2,19  | 2,16 | 0,0            | 0,25  | 0,62 | 2,0       | 1,81  | 1,53 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 34     | 0,43   | 0,76  | 2,62 | 2,18  | 2,14 | 0,0            | 0,25  | 0,62 | 2,0       | 1,81  | 1,51 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 35     | 0,42   | 0,75  | 2,62 | 2,17  | 2,13 | 0,0            | 0,25  | 0,61 | 2,0       | 1,80  | 1,50 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 36     | 0,41   | 0,74  | 2,62 | 2,16  | 2,12 | 0,0            | 0,24  | 0,61 | 2,0       | 1,80  | 1,49 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 37     | 0,40   | 0,74  | 2,62 | 2,14  | 2,11 | 0,0            | 0,24  | 0,60 | 2,0       | 1,79  | 1,48 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 38     | 0,39   | 0,73  | 2,62 | 2,13  | 2,09 | 0,0            | 0,24  | 0,60 | 2,0       | 1,79  | 1,46 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 39     | 0,38   | 0,73  | 2,62 | 2,12  | 2,08 | 0,0            | 0,24  | 0,59 | 2,0       | 1,78  | 1,45 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 40     | 0,37   | 0,72  | 2,62 | 2,11  | 2,07 | 0,0            | 0,24  | 0,59 | 2,0       | 1,78  | 1,44 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 41     | 0,36   | 0,71  | 2,62 | 2,10  | 2,06 | 0,0            | 0,23  | 0,58 | 2,0       | 1,77  | 1,43 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 42     | 0,35   | 0,71  | 2,62 | 2,09  | 2,05 | 0,0            | 0,23  | 0,58 | 2,0       | 1,77  | 1,42 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 43     | 0,35   | 0,70  | 2,62 | 2,08  | 2,04 | 0,0            | 0,23  | 0,57 | 2,0       | 1,76  | 1,41 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 44     | 0,34   | 0,70  | 2,62 | 2,07  | 2,03 | 0,0            | 0,23  | 0,57 | 2,0       | 1,76  | 1,39 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 45     | 0,33   | 0,69  | 2,62 | 2,06  | 2,01 | 0,0            | 0,23  | 0,57 | 2,0       | 1,75  | 1,38 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 46     | 0,32   | 0,69  | 2,62 | 2,05  | 2,00 | 0,0            | 0,22  | 0,56 | 2,0       | 1,75  | 1,37 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 47     | 0,31   | 0,68  | 2,62 | 2,04  | 1,99 | 0,0            | 0,22  | 0,56 | 2,0       | 1,74  | 1,36 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 48     | 0,31   | 0,67  | 2,62 | 2,03  | 1,98 | 0,0            | 0,22  | 0,55 | 2,0       | 1,74  | 1,35 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 49     | 0,30   | 0,67  | 2,62 | 2,02  | 1,97 | 0,0            | 0,22  | 0,55 | 2,0       | 1,74  | 1,34 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| 50     | 0,29   | 0,66  | 2,62 | 2,01  | 1,96 | 0,0            | 0,22  | 0,54 | 2,0       | 1,73  | 1,33 | 0,79   | 0    | 1,2  |
| Unités |        |       | M€   | M€    | M€   | M€             | M€    | M€   | M€        | M€    | M€   | M€     | M€   | M€   |