Évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert

Michel Hathout

▶ **To cite this version:**

Michel Hathout. Évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2018. Français. NNT : 2018PESC1005 . tel-01880424

HAL Id: tel-01880424
https://theses.hal.science/tel-01880424

Submitted on 24 Sep 2018

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.

UNIVERSITÉ PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE *« VILLE, TRANSPORTS ET TERRITOIRES »*

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est

Discipline : Génie Urbain

Michel HATHOUT

Evaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert

Thèse dirigée par ***Youssef DIAB***

Soutenue le 3 avril 2018

Jury :

Pr	Didier DUBOIS	Directeur de recherche CNRS, Université Toulouse III-Paul Sabatier	Président du jury
Pr	Mireille BATTON-HUBERT	Ecole des Mines de Saint-Etienne	Rapporteur
Pr	Thierry VERDEL	École des Mines de Nancy	Rapporteur
Dr	Aurélie TALON	Université Blaise Pascal – Polytech' Clermont-Ferrand	Examinateur
Pr	Youssef DIAB	Université Paris-Est Marne la Vallée	Directeur de thèse
HDR	Laurent PEYRAS	IRSTEA	Co-Directeur de thèse
Dr	Marc VUILLET	EIVP	Co-Encadrant de thèse
Dr	Claudio CARVAJAL	IRSTEA	Co-Encadrant de thèse

REMERCIEMENT

Je tiens tout d'abord à exprimer ma grande reconnaissance à Monsieur **Youssef DIAB** -Professeur, de l'université Paris-Est Marne-la-Vallée, directeur de thèse, pour son implication, ses précieux conseils et la confiance témoignée lors de cette recherche.

J'exprime également ma profonde gratitude à Monsieur **Laurent PEYRAS** - Ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts – HDR, de l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, Co-directeur de thèse, pour son encadrement au quotidien, son attention et sa disponibilité bienveillante tout au long des travaux de recherche.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur **Marc VUILLET** - Chargé de recherche, de l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, Co-encadrement scientifique de thèse, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et ses encouragements.

J'adresse également mes profondes remerciements à monsieur **Claudio CARVAJAL** - Ingénieur de recherche, de l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, Co-encadrement scientifique de thèse, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien.

J'adresse toute ma reconnaissance au Professeur **Didier DUBOIS** – Directeur de recherche, du CNRS – Institut de Recherche en informatique de Toulouse, pour avoir accepté de présider mon jury de thèse.

J'exprime également toute ma gratitude à Madame **Mireille BATTON-HUBERT** – Professeur de l'Ecole Nationale des Mines de St-Etienne et au Monsieur **Thierry VERDEL**- Professeur, de l'Ecole nationale des Mines de Nancy, Laboratoire GeoRessources, Université de Lorraine ; Recteur de l'Université Senghor à Alexandrie-Egypte pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer au jury et d'être les rapporteurs de ce travail de thèse.

J'exprime également toute ma gratitude à Madame **Aurélie TALON** – maître de conférences de l'Université Blaise Pascale – Polytech' / Clermont-Ferrand – institut pascal UMR, qui m'a fait le privilège d'être examinatrice de mon travail de recherche.

Pour les bonnes conditions dans lesquelles j'ai pu effectuer ma thèse, je remercie toute l'équipe génie civil à l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture à Aix-en-Provence ainsi que toute l'équipe du laboratoire d'urbanisme Lab'Urba à l'école des ingénieurs de la ville de Paris à Paris.

RESUME

Evaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert

Les digues de protection contre les inondations sont d'une importance stratégique incontournable pour la sécurité des personnes et des biens. Une meilleure connaissance de leur fiabilité structurelle constitue un enjeu majeur pour les ingénieurs et pour les gestionnaires de ces ouvrages afin de répondre aux réglementations en vigueur et potentiellement les faire évoluer. La réglementation en France relative à la sûreté des ouvrages hydrauliques exige la réalisation d'études de dangers, au sein desquelles les démarches probabilistes d'évaluation de la sécurité prennent une place de plus en plus importante.

De par la complexité de leurs mécanismes de rupture et l'absence de condition d'état-limite précis pour certains mécanismes de défaillance tels que l'érosion interne, la surverse ou l'affouillement, le calcul d'une probabilité de défaillance par des approches quantitatives demeure à ce jour impossible. Les digues induisent des problématiques particulières pour l'évaluation de leur fiabilité structurelle où l'intervention d'experts s'avère nécessaire et centrale. Ceux-ci doivent procéder à l'interprétation des données disponibles et la prise en compte de leurs incertitudes, pour pouvoir ensuite évaluer la fiabilité structurelle de digues en termes de probabilité de défaillance.

L'objectif de la thèse est l'élaboration d'une démarche complète d'aide à l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues à partir du jugement expert. Une démarche scientifiquement justifiée pour le recueil et l'exploitation des évaluations expertes, incertaines mais quantitatives, de la fiabilité structurelle des ouvrages, sous la forme d'une probabilité de défaillance ou d'un coefficient de sécurité, assorti(e) d'une marge d'incertitude probabiliste.

Afin de répondre à cet objectif, deux démarches ont été développée, « EiCAD » et « EiDA », toutes reposant (dans des ordres différents) sur les phases suivantes :

- Une phase d'élicitation individuelle des avis experts (Ei) permettant le recueil des évaluations expertes probabilistes par la construction d'un formulaire de questionnement ;
- Une phase de calibration (C) permettant de pondérer les évaluations expertes en fonction des degrés de précision et de justesse ;
- Une phase d'agrégation (A) permettant une prise en compte simultanée de plusieurs évaluations expertes probabilistes ;
- Une phase de dé-biaisage (D) permettant de traiter les biais susceptibles d'entacher les évaluations expertes probabilistes.

Les démarches développées ont été mises en œuvre sur des cas de digues du Drac, dans l'agglomération grenobloise, pour évaluer la probabilité de défaillance, par jugement expert, vis-à-vis de mécanisme de rupture par glissement et par érosion interne.

***Mots clés** : digues, incertitudes, jugement expert, biais heuristiques, probabilités subjectives, fiabilité structurelle, élicitation, calibration, agrégation, dé-biaisage.*

ABSTRACT

Probabilistic evaluation of the structural reliability of river levees based on expert judgment

River levees as protective measures against flooding are a matter of utmost strategic importance for the security of people and property. A better knowledge of their structural reliability is a major challenge for engineers and managers of these structures in order to meet current regulations and potentially develop them. In France, the regulations relating to the safety of hydraulic structures require the realization of hazard studies, in which probabilistic safety evaluation procedures take on a more and more important role.

Due to the complexity of their failure mechanisms and the lack of a specific condition of limit-state for some failure mechanisms such as internal erosion and overtopping or scour, calculating a probability of failure by quantitative approaches remains impossible to this day. Levees induce specific problems in evaluating their structural reliability where expert intervention is necessary and pivotal. They must interpret the available data and take into account the uncertainties in their analysis, in order to evaluate the structural reliability of levees in terms of probability of failure.

The aim of the thesis is to develop and elaborate a complete approach for supporting probabilistic evaluation of structural reliability of levees based on expert judgments. It is designed as a scientifically justified approach to collect and use uncertain but quantitative expert evaluations of structural reliability, in the form of a failure probability or a safety factor, accompanied by a margin of probabilistic uncertainty.

To meet this goal, two approaches have been developed, "EiCAD" and "EiDA" composed of the following phases (in different orders):

- individual elicitation phase of expert judgment (Ei) allowing the collection of probabilistic expert evaluations by a constricted questionnaire ;
- calibration phase (C) to weigh the probabilistic expert evaluations elicited depending on the degrees of precision and accuracy that can be provided;
- aggregation phase (A) during which the probabilistic expert evaluations elicited by several experts are taken into account ;
- debiasing phase (D) during which biases that may affect the probabilistic expert evaluations are removed.

The developed approaches have been implemented for the cases of Drac levees, located in the Grenoble agglomeration, to assess the probability of failure, by expert judgment, with regard to sliding and internal erosion mechanism of failure.

Keywords: *levees, uncertainties, expert judgment, heuristic biases, subjective probabilities, structural reliability, elicitation, calibration, aggregation, debiasing.*

Laboratoire de rattachement et partenaires de la thèse

Dans le cadre du projet scientifique **INCERTU** du programme « Risque Décision Territoire - **RDT** » financé par le ministère de la transition écologique et solidaire, la thèse a été préparée au sein du laboratoire d'urbanisme **Lab'HRBA** via ses deux tutelles : l'université Paris-Est Marne-la-Vallée – **UPEM** et l'école des ingénieurs de la ville de Paris - **EIVP** et au sein de l'institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture – **irstea** / unité de recherche RECOVER.

Cité Descartes - Bâtiment Bienvenüe
- Plot A
14 - 20 Boulevard Newtown
Champs sur Marne
77454 Marne la Vallée cedex 2

3275 Route de Cézanne - CS 40061
13182 Aix-en-Provence Cedex 5

80, rue Rébeval
75019 Paris

5 boulevard Descartes
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée Cedex 2

http://rdt-risques.fr/

SOMMAIRE

REMERCIEMENT i
RESUME ii
ABSTRACT iii
Laboratoire de rattachement et partenaires de la thèse iv
SOMMAIRE v
INTRODUCTION 1
Partie I Contexte d'évaluation de la fiabilité des digues fluviales 5
1 Etat de l'art sur les méthodes d'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales 6
1.1 Les digues 6
1.2 Approches courantes de l'ingénierie pour l'évaluation de la sûreté des digues fluviales 17
1.3 Approche fonctionnelle déterministes pour l'évaluation de la sûreté des digues 18
1.4 Approches probabilistes pour l'évaluation de la sûreté des digues 19
1.5 Synthèse 27
2 Experts, jugement expert et biais 28
2.1 Experts et panel d'experts 28
2.2 Les biais 31
2.3 Synthèse 34
3 Traitement du jugement expert mis en œuvre pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques 36
3.1 Traitement du jugement expert dans la littérature statistique 36
3.2 Traitement et élicitation quantitatifs des dires d'experts mis en œuvre pour l'évaluation de la sûreté des ouvrages hydrauliques 37
3.3 Traitement et élicitation des dires experts mis en œuvre pour l'évaluation de la performance des digues fluviales 39
3.4 Synthèse 39
4 Proposition de thèse 41
4.1 Problématique de la thèse 41
4.2 Objectif de la thèse 42
4.3 Questions scientifiques 42
4.4 Méthodologies scientifiques disponibles 43

4.5 Démarches de la thèse 43

Partie II Méthodologies pour l'identification et la réduction des biais heuristiques susceptibles d'altérer les évaluations expertes du niveau de sûreté des digues fluviales 46

5 Méthodes de recueil et de traitement des évaluations à dires d'experts 47

5.1 Principes des méthodes de traitement du jugement d'expert 48

5.2 Méthodes d'élicitation du jugement d'expert 51

5.3 Méthodes de calibration et d'agrégation des évaluations à dires d'experts 60

5.4 Méthodes de dé-biaisage du jugement d'expert 71

5.5 Récapitulatif des méthodes de traitement des biais du jugement d'expert 79

5.6 Synthèse 81

6 Proposition d'une démarche de traitement du jugement d'expert pour l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert 83

6.1 Principes de la démarche proposée 85

6.2 Démarches pour l'élicitation des jugements d'experts 87

6.3 Démarches pour la calibration et l'agrégation des jugements d'experts 100

6.4 Démarches pour le dé-biaisage des jugements d'experts 107

6.5 Approches proposées 116

6.6 Synthèse 124

Partie III Application et valorisation 126

7 Présentation de l'étude de cas 127

7.1 Données géométriques 128

7.2 Données géotechniques 132

7.3 Données hydrauliques 133

7.4 Synthèse 134

8 Application de l'approche « EiCAD » 135

8.1 Approche « EiCAD » - Elictation individuelle, Calibration, Agrégation et Dé-biaisage des avis experts 136

8.2 Comparaison des résultats des modalités 170

8.3 Conclusion générale de l'approche « EiCAD » 171

9 Application de l'approche « EiDA » 172

9.1 Approche « EiDA » - Elicitation individuelle, Dé-biaisage et Agrégation des avis experts 173

9.2 Comparaison des modalités 197

9.3 Conclusion générale de l'approche « EiDA » 198

10 Comparaison des approches « EiCAD » et « EiDA » 199

10.1 Comparaison quantitative des approches « EiCAD » et « EiDA » selon les modalités d'application 199

10.2 Application d' « EiCAD » et d' « EiDA » sur les variables d'intérêt 202

10.3 Analyse inter-comparée des approches 207

CONCLUSION 209

BIBLIOGRAPHIE 212

LISTE DES TABLEAUX 219

LISTES DES FIGURES 222

LISTE DES ANNEXES 227

ANNEXES 229

Annexe A Extrait du formulaire de questionnement

Annexe B Résultat de la phase d'« Ei » (élicitation individuelle) du panel d'experts

Annexe C Résultat de la phase de Dé-biaisage des avis bruts du panel d'experts – Approche « EiDA »

INTRODUCTION

Les digues fluviales sont des structures généralement en remblai de terre, conçues et construites pour contenir, contrôler ou détourner le flux d'eau de manière à réduire les risques d'inondation temporaire. L'inondation est une submersion temporaire, par l'eau, de terres qui ne sont pas submergées en temps normal.

Du point de vue de l'ingénierie, les digues connaissent de nombreux mécanismes de défaillance pouvant se combiner à des échelles de temps et d'espace variés, jusqu'à aboutir, lors de la mise en charge, à leur rupture. Les quatre mécanismes de rupture des digues sont les suivants : la surverse, l'érosion interne, l'affouillement et le glissement. Du point de vue du génie urbain et de l'aménagement urbain, les digues représentent des ouvrages d'une importance stratégique pour la sécurité des personnes et des biens. Ces ouvrages peuvent être donc considérés comme une porte d'entrée du risque au milieu urbain, un risque pouvant altérer gravement les fonctionnements de la ville et sa résilience. Si en fonctionnement « normal » les digues empêchent lors des crues les venues d'eau dans des espaces urbanisés auparavant naturellement inondables, une rupture soudaine de ces ouvrages peut provoquer une vague de submersion assimilable à une rupture de barrage, où la vitesse et la force de l'eau peuvent provoquer des dégâts considérables, comme cela a malheureusement été le cas, lors de la tempête Xynthia, l'ouragan Katrina à la Nouvelle-Orléans par exemple. Dès lors, le contexte d'évaluation de la fiabilité des digues devient un enjeu majeur pour les ingénieurs et pour les gestionnaires de ces ouvrages afin de pouvoir anticiper ou prévoir d'un risque de défaillance.

Dans un objectif de réduction du risque de défaillance, la réglementation française relative à la sûreté des ouvrages hydrauliques a été renforcée (décret du 11 décembre 2007). Elle exige de réaliser des diagnostics périodiques et des études de dangers intégrant l'évaluation probabiliste de leur niveau de sécurité pour plusieurs scénarios de crue. Dès lors, dans le contexte général de l'évaluation des systèmes et des structures de génie civil notamment les ouvrages hydrauliques, la fiabilité structurelle se présente comme un élément de réponse pertinent pour évaluer les enjeux de sécurité et de performance des structures de génie civil telles que les digues. La fiabilité structurelle correspond ici à la capacité d'une structure ou d'un élément structural à satisfaire aux exigences spécifiques, pour lesquels ils ont été conçus (EN1990, 2002).

Dans le domaine des digues fluviales, l'évaluation de la fiabilité structurelle est particulièrement délicate en raison des faibles quantités de données disponibles, la complexité des mécanismes de défaillances et l'hétérogénéité des ouvrages. Les digues sont des ouvrages anciens, mal connus, mal entretenus, mal documentés (pas de plans de construction ni rapports d'éventuels travaux de réparation ou de confortement), présentant des situations très variées en termes de constitutions et de conditions (Mériaux et *al.*, 2001). Leurs mécanismes de rupture complexes et l'absence de condition d'état-limite précis pour certains mécanismes de rupture tels que l'érosion interne et externe ou l'affouillement, ne permettent pas le calcul

d'une probabilité de défaillance par des approches quantitatives. Ce manque de données et de modèles rend la réalisation d'une étude d'analyse quantitative de fiabilité difficile à mettre en œuvre.

Cela nécessite de disposer de sources alternative de données et de méthodes d'analyse de risque adaptées à ce contexte et susceptibles de permettre la réalisation d'études de fiabilité. Aussi, de fait, le jugement expert joue un rôle significatif dans l'évaluation de la fiabilité des digues fluviales. En pratique, seul le mécanisme de rupture par glissement du talus bénéfice d'une définition et d'une caractérisation de l'état-limite suffisamment précise pour permettre le calcul d'une probabilité de défaillance par des approches quantitatives. Or pour les autres mécanismes de rupture (érosion interne, surverse, affouillement), le jugement expert se présente comme la seule source pertinente d'information permettant d'attribuer et d'évaluer une probabilité de défaillance des digues.

Or sur le plan cognitif, il a été établi que le jugement expert comporte des biais susceptibles d'altérer les aptitudes d'un expert à éliciter sa réelle opinion. Les biais correspondent à des distorsions entre la façon dont l'expert raisonne et celle qu'il devrait adopter pour assurer le mieux possible la validité de ses inférences et de ses conclusions (Yachanin et Tweney, 1982). Dès lors, le traitement - par une démarche complète de traitement du jugement expert - des biais susceptibles d'altérer les évaluations issues du jugement expert demeure un besoin de premier ordre pour les ingénieurs.

Il apparait nécessaire de proposer une démarche justifiée scientifiquement permettant l'exploitation du jugement d'expert en vue d'évaluer la fiabilité structurelle des digues fluviales en termes de probabilité de défaillance vis-à-vis des mécanismes de rupture pour lesquels une définition et une caractérisation de l'état-limite précises n'existent pas. Une démarche permettant l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues destinée aux ingénieurs des bureaux d'études et des services techniques des gestionnaires prenant en compte le plus explicitement possible les biais susceptibles d'entacher les évaluations expertes apparait comme particulièrement précieuse..

La problématique de la thèse s'articule selon trois questions scientifiques :

1. l'élicitation des avis experts : comment éliciter et recueillir des évaluations expertes probabilistes dans un contexte incertain ?
2. l'agrégation des avis experts : comment prendre en compte simultanément les avis probabilistes de plusieurs experts ?
3. le traitement des biais experts : comment exploiter les évaluations expertes pour identifier et réduire les biais suite à la phase d'élicitation ?

La recherche bibliographique consacrée à trouver des méthodes pour traiter ces questions a montré que la littérature du génie civil est moins riche en méthode de traitement du jugement expert que la littérature statistique. Les méthodes issues de cette dernière ont fait l'objet d'application dans plusieurs domaines comme l'économie, l'actuariat, l'énergie, l'aérospatiale. Plusieurs méthodes ont été développées pour répondre à des questions issues de l'utilisation du jugement expert comme : 1) la pondération des avis expert, 2) la calibration et

l'agrégation des différents avis experts, 3) le dé-biaisage des avis experts. Dès lors, l'ambition de cette recherche est de mobiliser la richesse des modèles mathématiques issus de la littérature statistique pour les adapter au contexte de génie civil et des digues fluviales afin de répondre à l'objectif de recherche suivant : ***élaborer une démarche complète d'aide à l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert en contexte de données incertaines et de mécanismes de défaillance complexes***.

Dans ce cadre, l'élicitation individuelle « **Ei** », la calibration « **C** », l'agrégation « **A** » et le dé-biaisage « **D** » des avis experts sont les éléments méthodologiques principaux qui vont permettre la construction de la démarche probabiliste attendue dans cette thèse. Aussi le manuscrit est organisé selon trois parties suivantes :

- La **partie 1 « Contexte d'évaluation de la fiabilité des digues fluviales »** synthétise : 1) les aspects conceptuels relatifs aux digues fluviales, les approches d'ingénieries, fonctionnelles et probabilistes d'évaluation des digues et, 2) les éléments du jugement expert et sa problématique.
  Elle se termine par une présentation du sujet de thèse et ses éléments associés : contexte, problématique, objectif, questions scientifiques et proposition d'une démarche de thèse.

- La **partie II « Méthodologie de traitement du jugement expert pour l'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert »** expose un état de l'art sur 1) les principes d'utilisation des modèles d'exploitation du jugement expert et du traitement des biais experts et 2) les principes de chaque modèle et leur adaptation (accompagnée par des exemples) au domaine des digues.
  Elle se termine par une présentation détaillée des approches « EiCAD » et « EiDA » développées dans ce travail de thèse pour l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert.

- La **partie III « Application et valorisation »** expose une application des approches développées à une étude de cas « la digue du Drac- rive gauche ».

Partie I

Contexte d'évaluation de la fiabilité des digues fluviales

Contenu de la Partie I

Chapitre 1
- Définition : digue, mécanismes de rupture, contexte d'évaluation de la fiabilité structurelle des digues, incertitudes et données disponibles sur les digues
- Approches d'ingénieries, fonctionnelles et probabilistes d'évaluation des digues.

Chapitre 2
- Eléments du jugement expert : expert et panel d'experts
- Problématique du jugement expert : les biais

Chapitre 3
- Contexte général du traitement du jugement expert
- Méthodes du traitement du jugement expert pour les digues

Chapitre 4
- Eléments de thèse : contexte, problématique, objectif, questions scientifiques et proposition d'une démarche de thèse

1 Etat de l'art sur les méthodes d'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales

Ce premier chapitre a comme objectif de définir les concepts de base liés aux digues, leurs différentes typologies, leurs différents mécanismes de rupture et le contexte de l'évaluation de leur fiabilité ; et, de présenter les approches d'ingénieries, fonctionnelles et probabiliste en France et à l'international concernant l'évaluation de la fiabilité de ces ouvrages.

1.1 Les digues

1.1.1 Définition des digues fluviales

Une digue est « *une construction établie dans le but de contenir les eaux ou de protéger de leurs effets* (Kurtz, 1997) ». Une digue fluviale, ou encore digue de protection contre les inondations est une digue dont au moins une partie est construite en élévation au-dessus du niveau du terrain naturel et destinée à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables (Mériaux *et al.*, 2004).

Le Programme national américain d'assurance contre les inondations (NFIP) défini une digue comme « *une structure, généralement un remblai de terre, conçue et construite pour contenir, contrôler ou détourner le flux d'eau de manière à réduire les risques d'inondation temporaire* » ; il définit aussi le « système digue » comme « *un système de protection contre les inondations qui se compose d'une digue ou de plusieurs digues, et les structures associées telles que les dispositifs de fermeture et de drainage qui sont construits et exploités conformément aux normes d'ingénierie relatives* (NFIP, 2000) ».

En général, la digue correspond à un ouvrage, le plus souvent en terre, construit le long du lit mineur du cours d'eau ou le long d'un canal ou le long du trait de côte et destiné à protéger les parcelles riveraines des venues d'eau ou à surélever la ligne d'eau (navigation, hydroélectricité) (Degoutte *et al.*, 2012).

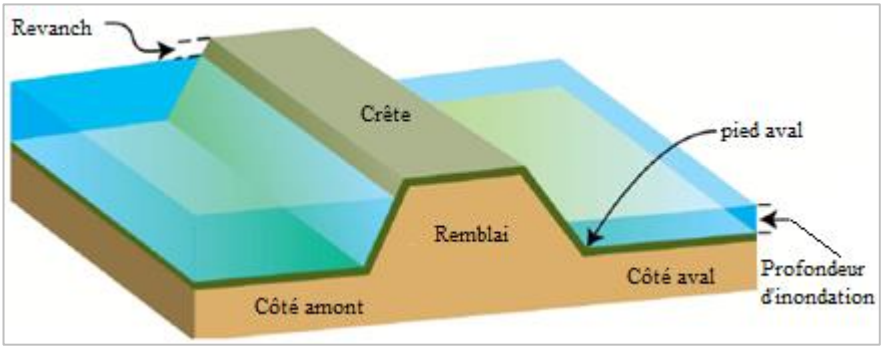


Figure 1-1. Les différents composants d'une digue (Traduit et adapté de NFIP, 2000)

1.1.2 Les enjeux des territoires protégés par les digues fluviales

En France d'après le Ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD, 2014), le risque inondation concerne une commune sur trois à des degrés divers dont 300 grandes agglomérations. Pour 160.000 km de cours d'eau, une surface de 22.000 km² est reconnue particulièrement inondable : deux millions de riverains sont concernés. Les dégâts causés par les inondations représentent environ 80 % du coût des dommages imputables aux risques naturels, soit en moyenne 250 M€ par an. La moitié de cette somme relève des activités économiques (MEDD, 2014).

Au titre d'exemple, sur les 450 km de la Loire Moyenne (entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine), 600 km de digues protègent quelque 100.000 km² de vals inondables. Auxquels s'ajoutent les digues érigées le long des affluents tels que le Cher, l'Indre et la Vienne. Plusieurs villes importantes sont protégées par les digues comme : Tours avec 90.000 habitants concernés, Orléans et son agglomération avec 40.000 habitants, Blois avec 10.000 habitants, le Val d'Authion avec 45.000 habitants (Mériaux *et al.*, 2001).

Ces exemples montrent l'existence d'une forte interaction entre les ouvrages de protection contre les inondations et les territoires incluant les villes. En cas de défaillance, ces ouvrages sont donc susceptibles de propager des dysfonctionnements bien au-delà des zones soumises à l'aléa, et, par conséquent, causer beaucoup de dégâts. Ces ouvrages peuvent être considérés, du point de vue du génie urbain et de l'aménagement urbain, comme une porte d'entrées du risque au milieu urbain. Dès lors, une meilleure connaissance de leur fiabilité structurelle, face à un risque d'inondation redoutable, devient un enjeu urbain majeur pour les ingénieurs et pour les gestionnaires des ouvrages.

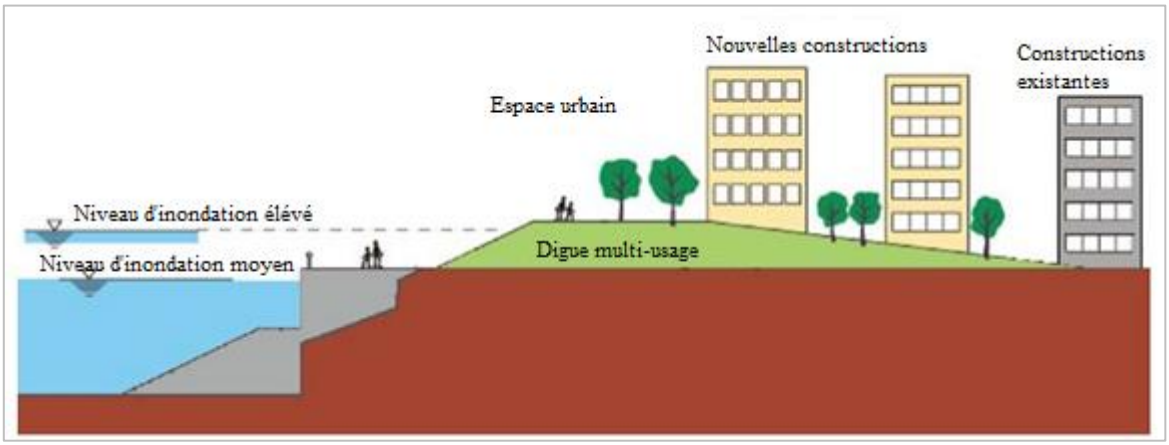


Figure 1-2. Section transversal illustrant l'interaction entre les digues et la ville (Traduit et adapté de Arcadis/FXFOWLE-CITY ATLAS, http://newyork.thecityatlas.org/lifestyle/manhattan-2014-back-and-getting-bigger-than-ever-2/)

1.1.3 La typologie des digues fluviales

Les digues fluviales peuvent être catégorisées selon trois grands types : 1) les digues en remblai homogène, 2) les digues en remblai zoné et 3) les digues de type murs poids (Mériaux et *al.*, 2001).

Dans la suite de cette recherche, les digues en remblais homogènes feront le type des digues sur lequel la méthodologie développée sera appliquée. Elles sont construites dans un même matériau généralement pris sur place. Elles constituent la majeure partie du parc français et les digues anciennes relèvent de cette catégorie. Les digues en remblai homogène recoupent une grande diversité de situations. Ces ouvrages peuvent être construits en matériaux fins ou grossiers, relativement homogènes ou très hétérogènes, en une seule étape ou rehaussés au cours du temps, parfois avec des matériaux variés ou selon des techniques de dispositions différentes (Mériaux et *al.*, 2001).

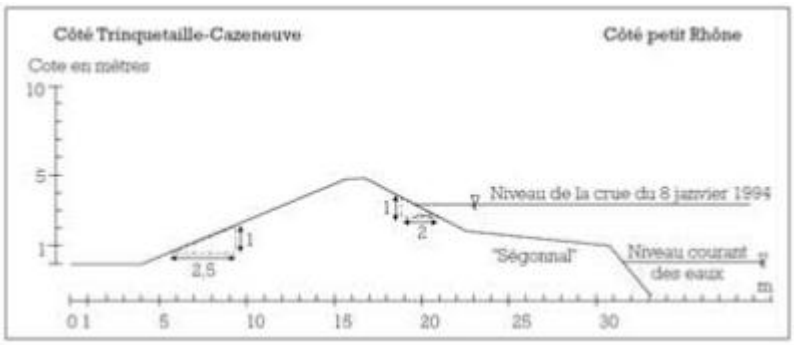


Figure 1-3. Exemple de Digue en remblai homogène sur le Rhône (Mériaux *et al.*, 2001)

Les digues en remblai zoné sont constituées de plusieurs matériaux disposés en couches successives, chacune ayant une fonction particulière. La grande majorité de ces ouvrages sont de construction récente. La nature du matériau, sa granulométrie, l'épaisseur et la disposition des couches sont issues de dimensionnements liées aux fonctions qui lui sont assignées : étanchéité, soutènement, drainage, etc. (Mériaux et *al.*, 2001).

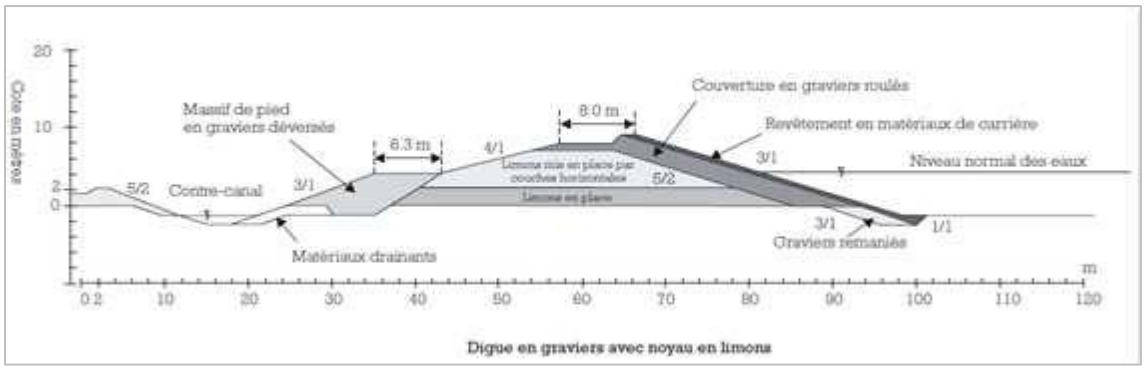


Figure 1-4. Exemple de digue en remblai zoné (Mériaux et *al.*, 2001)

Les digues de type mur poids sont des digues maçonnées, fréquentes aux abords des centres ville anciens. Elles peuvent être mixtes lorsqu'elles sont adossées à un remblai (Mériaux et *al.*, 2001).

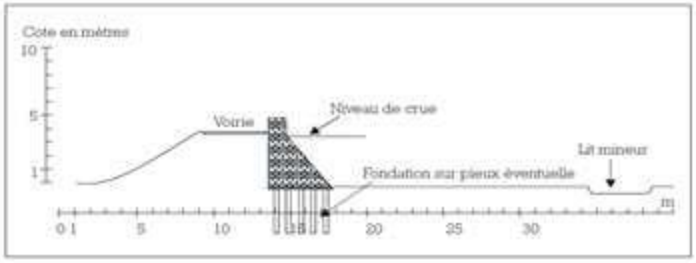


Figure 1-5. Exemple de digue mixte : mur poids et remblai (Mériaux et *al.*, 2001)

1.1.4 Les mécanismes de rupture des digues fluviales

Les digues connaissent de nombreux mécanismes de dégradation pouvant se combiner à des échelles de temps et d'espaces variés, jusqu'à aboutir, lors de la mise en charge, à la rupture et la défaillance d'un ouvrage (Mériaux et *al.*, 2001).

La ***rupture*** « est un mouvement d'une partie d'une digue ou de sa fondation, tel que l'ouvrage ne puisse plus retenir l'eau (ICOLD, 1995) ». La rupture de digue correspond à l'ouverture d'une ***brèche*** conduisant à l'inondation de la zone « protégée ». Le terme ***défaillance*** d'une digue rejoint le principe de la rupture et se définit comme l'incapacité d'atteindre un seuil de performance relatif à une fonction donnée, ici la protection contre les inondations. Elle peut concerner tout le système d'endiguement, ou ses sous-systèmes ou les composants de ces derniers (Tourment et *al.*, 2015).

L'International Levee Handbook (ILH), premier ouvrage de référence sur les digues, différencie entre deux type de défaillance des digues : défaillance structurelle et défaillance hydraulique (ILH, 2013). La défaillance structurelle se produit par une brèche dans le système d'endiguement qui résulte d'un dommage affectant au moins une fonction du système. La défaillance hydraulique (non structurelle) se produit si l'entrée d'eau dans la zone dégagée (par écoulement traversant, débordement ou dépassement de la digue) se produit avant que le niveau de protection prévu ne soit atteint et sans dommage préalable à l'élément système.

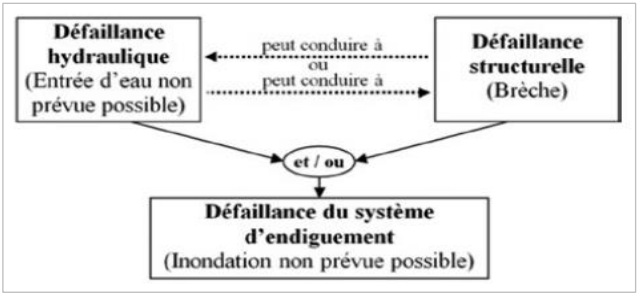


Figure 1-6. Les défaillances hydrauliques et structurelles: deux situation indépendantes ou non causer la défaillance d'un système d'endiguement (Tourment et *al.*, 2013b; Ciria et *al.*, 2013; Tourment et *al.*, 2014)

En général, la rupture de la digue conduisant à la brèche est provoquée par un mécanisme de rupture. Un ***mécanisme de rupture*** est un processus physique (mécanique, chimique, hydraulique…) comprenant un enchaînement de causes et d'effets qui conduisent à la dégradation des caractéristiques des matériaux et des propriétés des ouvrages (ICOLD, 1993). Pour les digues, ***un mécanisme de rupture*** correspond à un processus physique par lequel la digue peut être amenée à produire une « lâchure » d'un volume d'eau et, de fait, inonder la zone protégée.

Selon les pratiques de l'ingénierie et les guides de références en la matière (Lino *et al.*, 2000; Mériaux *et al.*, 2001; Fauchard et Mériaux, 2004), les digues fluviales connaissent quatre mécanismes de ruptures : l'érosion interne, la surverse, l'affouillement et le glissement de talus (amont ou aval).

- L'érosion interne

L'érosion interne recouvre l'ensemble des phénomènes d'arrachement puis d'entraînement des particules formant le corps d'un ouvrage en remblai, ou sa fondation, par les écoulements souterrains (en milieux poreux) qui s'y produisent (ERINOH, 2009).

Lorsque la digue est en eau (crue, marée haute), il se produit des écoulements d'eau au travers du corps de l'ouvrage en remblai, ou dans les sols de fondations. Ces écoulements peuvent être à l'origine de départ et de migration de matériaux lorsque le gradient hydraulique de la digue $\left(i_{global} = H/L\right)$ avec (H la hauteur de la charge hydraulique et L la longueur horizontale de l'écoulement sous l'ouvrage) atteint un seuil appelé gradient critique des matériaux constituants la digue ou sa fondation $\left(i_{critique}\right)$. Ces phénomènes sont particulièrement sensibles aux hétérogénéités de perméabilité, les secteurs les plus perméables concentrant les flux et accroissant les gradients et vitesses des écoulements (Référentiel, 2015).

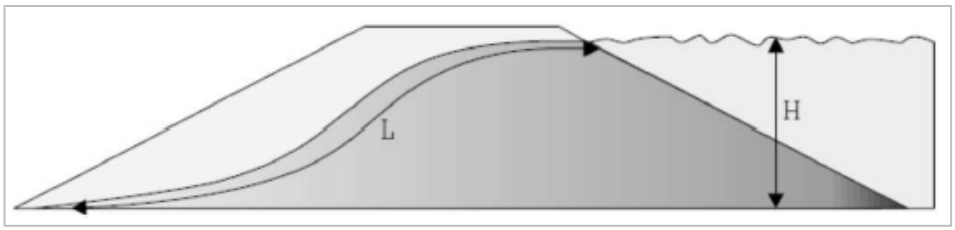


Figure 1-7. Illustration de la hauteur de la charge hydraulique et la longueur du trajet de l'écoulement (Mériaux et *al.*, 2001)

La perméabilité des terrains rencontrés et la durée de la crue sont les premiers facteurs favorisant la rupture par érosion interne. Plus particulièrement les hétérogénéités de perméabilité dans le corps de la digue peuvent être à l'origine de zones de circulation préférentielle de l'eau lorsque l'ouvrage est exposé à la crue (Mériaux et *al.*, 2001).

Il n'existe pas dans l'état de l'art actuel d'approche théorique reconnue dans les recommandations professionnelles pour évaluer avec précision le risque d'érosion interne. Une approche empirique (règle de Lane (1935) ou de Bligh (1927)) consiste à comparer le gradient hydraulique critique (i_{cr}) des matériaux constitutifs de la digue au gradient hydraulique global réel de la digue(i_{global}). Il est ainsi évalué le facteur de sécurité F_{EI} vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne. En règle générale, un risque d'érosion interne est possible lorsque le facteur de sécurité de la digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne est inférieur à $\leq 1.5{\sim}2$ (Référentiel, 2015).

$$F_{EI} = \frac{i_{cr}}{i_{glob}} \qquad [1]$$

Où :

F_{EI} : facteur de sécurité de digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne ;

i_{cr} : gradient hydraulique de matériaux constitutifs de la digue. Il s'agit d'un seuil limite à partir duquel les forces d'écoulement dans la digue deviennent suffisantes pour détacher et entraîner des particules fines du sol. Chaque classe de sol à son propre gradient critique selon le type d'érosion interne ;

i_{glob} : gradient hydraulique global réel de la digue (ou comme autre nomination gradient hydraulique de sortie i_{sortie}). Il s'évalue par une modélisation numérique permettant d'analyser l'écoulement d'eau dans la digue.

- La surverse

Elle se produire lorsque l'ouvrage est submergé par les eaux de crue. La lame d'eau prend de la vitesse en s'écoulant sur le talus aval et provoque l'érosion du pied de digue. L'érosion régressive du talus et de la crête, peut alors très rapidement mener à la rupture de l'ouvrage.

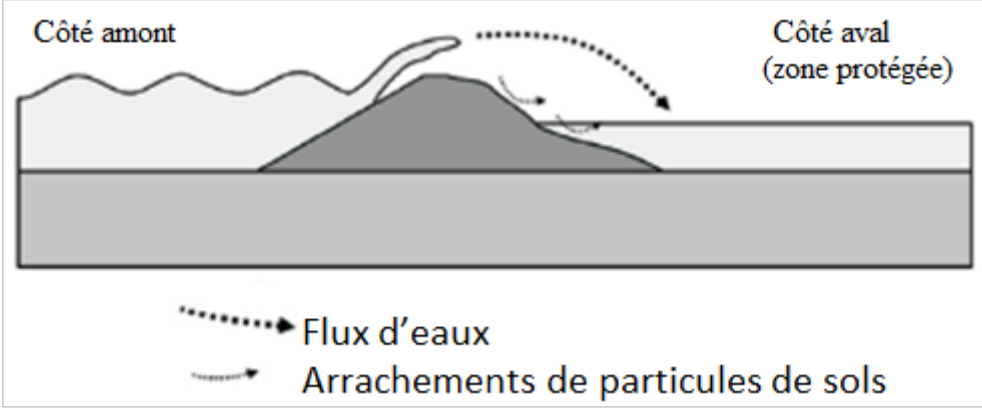


Figure 1-8. Principe de la surverse (Traduit est adapté de l'ILH, 2013)

La surverse, lorsqu'elle est incontrôlée, est un des facteurs d'affouillement les plus importants et les plus dévastateurs. Ce mécanisme constitue une des causes principales des ruptures de digues en remblai (Fauchard et Mériaux, 2004 ; Référentiel, 2015).

Les connaissances techniques actuelles ne permettent pas d'évaluer la résistance d'une digue en cas de surverse. Par précaution, l'ingénierie considère qu'une digue non prévue pour déverser connaîtra une brèche dès lors qu'il y a occurrence d'une surverse. On peut cependant avancer quelques éléments qualitatifs permettant de nuancer cet argument (Mériaux *et al.*, 2001) : 1) le caractère localement plus ou moins sableux des matériaux constitutifs des remblais et l'hétérogénéité dans la compacité sont des facteurs qui aggravent la sensibilité des digues à la surverse ; 2) un profil en long irrégulier de la crête de digue, avec présence de points bas dus à des défauts de nivellement ou à des tassements différentiels induit une concentration locale des débits de surverse ; 3) a contrario, une digue bien compactée, présentant un profil en long régulier, avec des talus bien enherbés et une crête revêtue est probablement susceptible de supporter des surverses de quelques centimètres.

- L'érosion externe

L'érosion externe regroupe tous les mécanismes qui provoquent des départs de matériaux sous l'effet de sollicitations s'appliquant sur la surface extérieure de la digue. Ces départs de matériaux induisent une diminution de la section de la digue, un raidissement des talus et conduisent à diminuer sa résistance. Ils conduisent à l'apparition de creusement dans les matériaux érodés, dénommé « affouillement » (Référentiel, 2015). Nous assimilons à l'affouillement le mécanisme d'érosion externe du talus de digue côté fleuve par le courant ou des corps flottants.

a) L'érosion côté zone protégée

L'érosion côté zone protégée se développe sous l'effet des interactions avec le milieu environnement de la digue et les usages qu'elle supporte. Les agressions météoriques (pluie, gel, ruissellement), la présence d'animaux fouisseurs, la circulation d'animaux d'élevage, les activités humaines et notamment le passage d'engins motorisés peuvent générer d'importants départs de matériaux et l'apparition d'instabilité de surface. Leur répétition et leur effet

cumulatif peuvent être à terme préjudiciable pour l'intégrité de l'ouvrage. Le parement côté eau subi ce même type d'érosion (Référentiel, 2015).

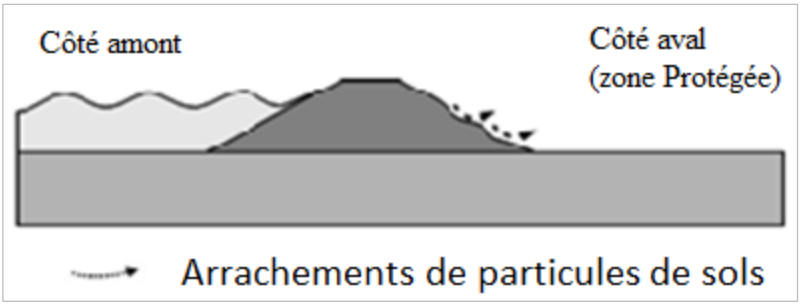


Figure 1-9. Erosion côté terre (Traduit est adapté de l'ILH, 2013)

b) L'érosion côté eau

En plus des mécanismes présentés dans le (a) ci-dessus, des affouillements se développent sous l'effet de l'action des vagues, des courants et des turbulences. Ces sollicitations peuvent être frontales ou obliques à l'ouvrage (vagues, houles, érosion de méandres) mais également longitudinales (courant d'une rivière, dérive littorale). Les affouillements sapent la base des ouvrages et conduisent à leur déchaussement lorsqu'ils affectent les sols supports (avant plage, berges). Ils peuvent aussi démanteler la protection puis altérer directement le corps des ouvrages. Les dommages liés aux affouillements sont généralement associés à l'évolution morpho-dynamique de la rivière ou du secteur de côte dans lequel s'insère l'ouvrage. Ils induisent souvent des phénomènes d'instabilité de la digue à différentes échelles (glissements superficiels ou profond affectant l'ouvrage du fait du départ de matériaux en butée de pied). Ils culminent dans une érosion généralisée de l'avant digue qui tend à déstabiliser l'ouvrage dans son ensemble ou à augmenter les sollicitations qui l'affectent (Référentiel, 2015).

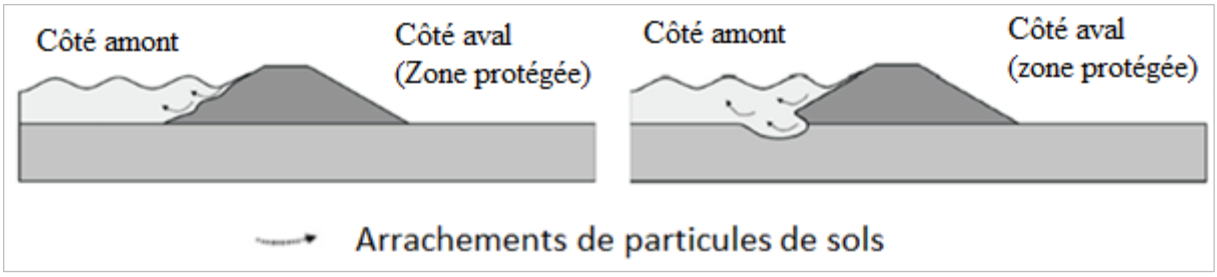


Figure 1-10. Érosion externe du corps ou de la fondation d'une digue en terre côté eau (Traduit est adapté de l'ILH, 2013)

- Le glissement

La stabilité des talus des ouvrages doit normalement être assurée par une conception et un dimensionnement respectant les règles de l'art géotechnique de la construction des ouvrages

en terre. Cependant, l'évolution des sollicitations au cours du temps, notamment en période de crue, peut conduire à des instabilités liées en particulier (Référentiel, 2015) :

- à l'accroissement des pentes de talus sous l'action de phénomènes d'érosion externe (suppression de la butée de pied) ;
- à l'augmentation des pressions hydrauliques au sein de l'ouvrage suite à des défauts de drainage et/ou à la présence de couches hétérogènes à comportements hydrauliques contrastés ;
- à l'augmentation des charges sur l'ouvrage ou les sols de fondation (nouvelle construction, rehausse, élargissement...) ;
- à l'évolution défavorable des caractéristiques des matériaux de constitution ou de fondations des ouvrages au cours du temps (cycle de dessiccation-imbibition, fluage, liquéfaction...).

Les principaux mécanismes d'instabilité des ouvrages en terre sont: les glissements superficiels, les glissements rotationnels ou translationnels, les tassements, la liquéfaction, les effondrements.

Nous nous focalisons dans notre recherche sur les glissements superficiels rotationnels et translationnels. Sous l'effet des agents météoriques, les caractéristiques mécaniques des matériaux situés en surface du corps de digue peuvent se dégrader. Des glissements superficiels intéressant les matériaux altérés du corps de digue peuvent alors apparaître lorsque la résistance au cisaillement de ces matériaux sera insuffisante à leur tenue dans la configuration géométrique des pentes de talus initiales de l'ouvrage.

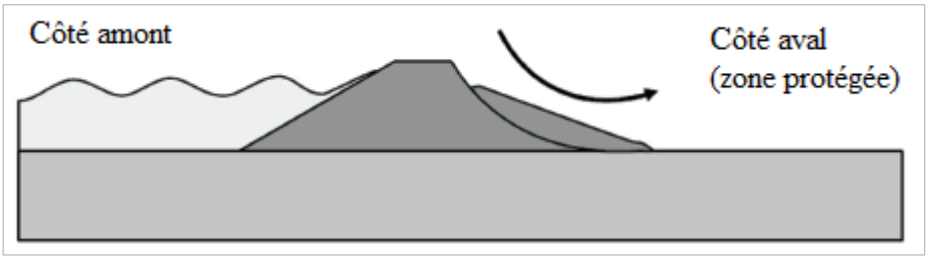


Figure 1-11. Glissements superficiels affectant un corps de digue en terre (Traduit est adapté de l'ILH, 2013)

1.1.5 L'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales, leurs données disponibles et leurs incertitudes

- Définitions générales

La fiabilité est un élément essentiel pour les enjeux de sécurité et de performance des systèmes mécaniques et des systèmes de génie civil. L'estimation de la fiabilité permet à la fois de comprendre le passé et de préparer le futur d'un système en mode d'évaluation. De nombreuses difficultés se posent au contexte d'évaluation de la fiabilité d'un système ou d'un composant d'un système : 1) la nature du système/composant, 2) la qualité du retour d'expérience et sa nécessaire validation avant tout usage et, 3) le niveau de la maintenance préventive qui vise à réduire la probabilité de défaillance (Lannoy, 2009).

Selon la norme Européenne EN 13306 (2001) liée aux domaines techniques, administratifs et de gestion de la maintenance, la fiabilité fonctionnelle est « *l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné* ». La Norme Européenne EN 1990 (2002) liée au domaine de la construction des systèmes de génie civil définit la fiabilité structurelle comme « *la capacité d'une structure ou d'un élément structural à satisfaire aux exigences spécifiées, y compris la durée d'utilisation de projet, pour lesquelles il ou elle a été conçu(e). La fiabilité structurelle s'exprime habituellement en termes de probabilité* ». En outre, cette norme exige qu'une structure (bâtiment et ouvrage de génie civil) doive être conçue et réalisée de sorte qu'elle doit, pendant sa durée de vie, résister à toutes les actions et influences susceptibles d'intervenir pendant son exécution et son utilisation et, elle doit aussi rester adaptée à l'usage pour lequel elle a été conçue.

Dans ce contexte et précisément dans le contexte des ouvrages hydrauliques, la réglementation en France relative à la sûreté des ouvrages hydrauliques a évolué (décret du 11 décembre 2007), avec l'obligation faite pour les propriétaires des grands ouvrages de produire des études de dangers, des revues périodiques de sûreté, requérant d'évaluer régulièrement les ouvrages hydrauliques par des démarches d'analyse de risques et d'introduire autant que possible des démarches probabilistes.

Or dans le domaine du génie civil, les ouvrages hydrauliques tels que les barrages et les digues ont toujours été considérés comme des ouvrages particuliers et sont restés à l'écart des règlements appliqués au bâtiment et aux ouvrages d'art. A ce titre, les Eurocodes qui visent à harmoniser progressivement le marché européen de la construction, n'ont pas vocation à être utilisés directement pour ces ouvrages spéciaux (Carvajal, 2009).

Les méthodes de fiabilité des structures ont fait l'objet d'un développement important au cours de ces dernières années (Sudret, 2007). En revanche, la richesse de ces méthodes est fortement conditionnée par la pertinence de la représentation des données d'entrée, correspondant aux propriétés des matériaux et aux données techniques disponibles sur l'ouvrage. Dans le domaine de digues fluviales, l'évaluation de la fiabilité structurelle est particulièrement délicate en raison des faibles quantités de données disponibles. Les digues fluviales sont des ouvrages anciens, certaines datant du Moyen Age (Mériaux *et al.*, 2001). Elles sont mal connues et ont généralement fait l'objet de peu de suivi au cours des siècles (Mériaux *et al.*, 2001). Souvent, on ne possède ni leurs plans de construction ni les rapports d'éventuels travaux de réparation ou de confortement. Même lorsqu'elles sont gérées de manière correcte, ce problème d'acquisition de connaissance sur les ouvrages subsiste, en partie à cause de l'âge des digues, de leur construction par étapes successives, de leur fort linéaire et de l'absence d'instrumentation à l'intérieur des ouvrages (Mériaux *et al.*, 2001). Ce manque de données rend la réalisation d'une étude d'analyse quantitative de fiabilité difficile à mettre en œuvre. Ce manque de données pourrait être présenté précisément par la présence des incertitudes entachant tous types de données disponibles sur les digues.

D'une manière générale, l'incertitude **«** résulte essentiellement d'une épreuve dont le résultat n'est pas connu a priori et pourrait changer si on la recommençait ; elle représente la variabilité intrinsèque d'un phénomène (Boissier, 1993) ». Bouchon-Meunier (1995) la décrit comme « un doute sur la validité d'une connaissance ». Par exemple : je crois que la date de

construction d'un bâtiment date de 1852 mais je n'en suis pas sûr (cas d'une connaissance précise mais incertaine). On distingue deux types d'incertitudes (entachant les données d'entrée) : incertitudes aléatoires et incertitudes épistémiques (Paté-Cornell, 1996 ; O'Hagan et *al.*, 2006 ; Zio, 2009 ; Aven, 2010 ; Sallak et *al.*, 2013). Les incertitudes aléatoires sont irréductibles et dues au caractère aléatoire ou à la variabilité naturelle d'un phénomène physique, tandis que les incertitudes épistémiques sont dues au caractère imprécis de l'information ou à un manque de connaissance et pourraient être réduites en faisant davantage d'efforts par le recueil de données, la consultation d'experts, les essais accélérés, etc. (Oberkampf et Helton, 2002 ; O'Hagan et *al.*, 2006).

- Les incertitudes entachant les données des digues

Dans le domaine des digues, les incertitudes épistémiques sont principalement les incertitudes liées à la dissémination des investigations le long des linéaires et la représentativité des données disponibles. *Exemple : nous disposons de sondages géotechniques renseignant de la nature d'un remblai de digue dont on souhaite connaître la performance. Nous ne sommes pas certains que les sondages soient représentatifs de l'ensemble de l'ouvrage, longitudinalement comme transversalement. Nous pouvons en revanche réduire cette incertitude épistémique en augmentant le nombre de sondages.*

Nous trouvons également les incertitudes épistémiques liées aux modèles, qui reposent sur des hypothèses présentant des incertitudes. *Exemple : les résultats d'une modélisation hydraulique de la ligne piézométrique au sein de la digue dépendent des hypothèses adoptées pour la perméabilité des matériaux, la durée de sollicitation des ouvrages, etc.* (Vuillet et *al.*, 2013).

Dans le même ordre d'idée, les incertitudes aléatoires sont principalement les incertitudes liées à la variabilité naturelle des propriétés des matériaux. *Exemple : nous possédons un grand nombre de mesures d'une propriété étudiée du remblai constitutif d'un corps de digue. On constate que d'un point à un autre, la propriété varie ; ceci implique, si la mesure de la propriété est considérée comme parfaite, une variabilité spatiale de cette propriété au sein du remblai. De même, pour un point donné la propriété mesurée peut varier au cours du temps à cause de mécanismes de dégradations ou de vieillissement.* Nous trouvons également les incertitudes liées au caractère aléatoire des sollicitations hydrauliques et hydrodynamiques. *Exemple : quelle est l'occurrence d'une crue atteignant telle hauteur critique et venant impacter une digue* (Vuillet et *al.*, 2013) *?*

- L'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales dans un contexte incertain

Du point de vue de l'ingénierie, seul le mécanisme du glissement bénéficie d'une définition et de caractérisation de l'état-limite suffisamment précises pour permettre le calcul d'une probabilité de défaillance par des approches quantitatives. Les autres mécanismes de défaillance (érosion interne, affouillement, surverse) présentent des difficultés significatives pour l'évaluation d'une probabilité de défaillance. Ces difficultés proviennent, en premier lieu, de la forte présence d'incertitudes épistémiques sur les données (manque de données

statistiques), et sur les mécanismes complexes de défaillance ; en deuxième lieu, elles proviennent des incertitudes aléatoires tout au long du linéaire de la digue, du fait de la variabilité naturelle de la disposition et des propriétés des matériaux constitutifs de l'ouvrage. Une autre difficulté réside également dans le manque des lois de comportement et de critères d'états-limites nécessaires pour modéliser le comportement réel de la défaillance des digues. Cela conduit à une prédominance du jugement expert dans l'évaluation d'une probabilité de défaillance.

- Synthèse

La double difficulté du manque de données d'un côté et, les incertitudes qui les entachent d'un autre côté, freine la possibilité d'utiliser des méthodes statistiques et probabilistes d'analyse de fiabilité. Cela nécessite de disposer tout d'abord d'une source alternative de données et de méthodes adaptées à ce contexte permettant la réalisation d'une étude de fiabilité. Comme évoqué ci-dessus dans le domaine des digues, on utilise par défaut l'expertise humaine permettant la réalisation d'une analyse de fiabilité par la détermination de probabilités subjectives de défaillance à dires d'experts.

1.2 Approches courantes de l'ingénierie pour l'évaluation de la sûreté des digues fluviales

Fauchard et Mériaux (2004) définissent des étapes constitutives pour un diagnostic de digue en ingénierie :

a. Etude préliminaire

Les études préliminaires comprennent l'analyse de l'historique de la digue, les levés topographiques, l'inspection visuelle détaillée, l'étude géologique, les études hydrologiques, hydrauliques et morpho dynamiques. Cette phase est déterminante pour la suite de l'étude. Elle permet de dresser un premier diagnostic de l'ouvrage, de préciser la nécessité et la localisation d'investigations géotechniques/géophysiques complémentaires à mener.

b. Reconnaissances géophysiques et géotechniques

La reconnaissance géophysique consiste à déduire les caractéristiques internes des digues en étudiant les variations d'un champ physique mesuré selon les profils en long. Les résultats donnent une image interne de la digue sur tout le linéaire. Les reconnaissances géophysiques permettent de refléter la nature et la répartition des matériaux, la présence d'hétérogénéités ou de conduites. L'interprétation des résultats des investigations géophysiques est délicate et il est souvent nécessaire de procéder à des sondages géotechniques afin de connaître la nature des matériaux représentés.

c. Modélisation numérique

Sur les profils ayant fait l'objet de reconnaissances géotechniques conséquentes, il est possible de calculer les coefficients de sécurité des digues vis-à-vis de certains mécanismes de rupture, dont le mécanisme de glissement. A ce titre, la modélisation numérique permet de tester rapidement les différents cas de charge et les différentes situations de projet. La

modélisation numérique trouve essentiellement ses limites dans la qualité et la représentativité des données servant à fixer les paramètres du modèle. Ainsi, pour les digues dont les levés et investigations géotechniques sont hétérogènes, certains paramètres sont difficiles à obtenir de façon représentative et fiable, en particulier les caractéristiques mécaniques.

d. Evaluation qualitative des digues par tronçons homogènes

Lors des études de diagnostic de digue, la pratique de l'ingénierie procède par découpage des linéaires en unité de constitution et de sollicitation homogènes. Cette pratique conduit à identifier des tronçons homogènes que l'on peut représenter chacun par un profil transversal, ponctuel sur le linéaire de digue. Le niveau de performance de chaque profil est ensuite évalué qualitativement au moyen de classes de performance

En synthèse, on remarque que pour chaque étude de diagnostic des digues, l'ingénieur doit interpréter les données disponibles sur les profils à partir de leur analyse, découper la digue en tronçons homogènes en faisant appel au jugement expert. Cette méthodologie de diagnostic utilisée par l'ingénierie permet d'aboutir *in fine* à une connaissance structurale des tronçons de digues. Cette connaissance est plus ou moins complète et fiable, selon les investigations réalisées.

1.3 Approche fonctionnelle déterministes pour l'évaluation de la sûreté des digues

Serre (2005) propose la construction d'indicateurs de performance pour l'évaluation des digues fluviales, suivant une démarche de modélisation fonctionnelle de leurs mécanismes de défaillance basée sur l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets. La modélisation fonctionnelle permet d'identifier et de lister les critères d'évaluation des digues. Il propose ensuite un modèle déterministe d'évaluation de la performance des digues basé sur une méthode d'aide à la décision multicritère : l'affectation à base de règles. Celle-ci permet de renseigner des critères d'évaluation des digues et la construction d'indicateurs de performance (Figure 1-12). Les indicateurs de performance sont ensuite intégrés à un SIG permettant de cartographier la performance des ouvrages.

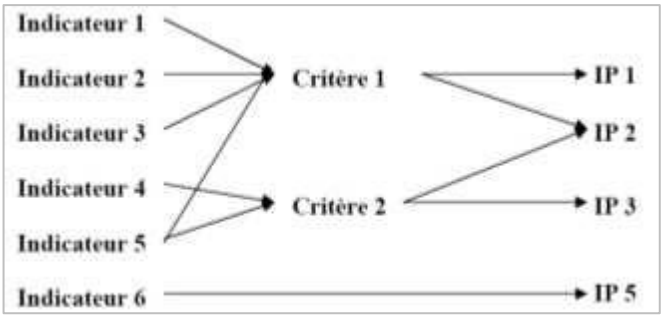


Figure 1-12. Construction d'indicateurs de performance (IP) pour les digues (Serre, 2005)

L'affectation à base de règles repose sur un principe de type SI…ET…ALORS, pour le renseignement des scores des critères d'évaluation des digues à partir d'indicateurs issus essentiellement de l'inspection visuelle des ouvrages (Figure 1-13).

Exemple : SI, il y a présence de trous profonds dans la recharge amont étanche liés à des espèces de type blaireau ou ragondin, ALORS, le phénomène devra être évalué comme mauvais/inacceptable, correspondant à une valeur de 10 sur l'échelle de performance définie pour les digues.

Ces règles sont déclinées ensuite pour l'évaluation et l'agrégation des critères jusqu'à l'obtention d'un score de performance pour le mécanisme de rupture.

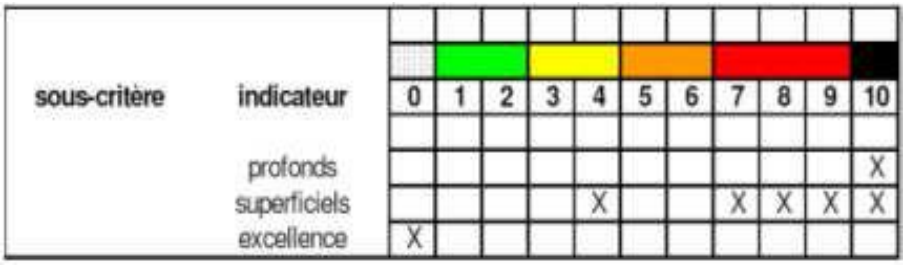


Figure 1-13. Evaluation du phénomène « trous d'animaux fouisseurs dans la recherche amont étanche » (Serre, 2005)

En synthèse de cette approche, il apparait que le modèle développé dans cette recherche permet la réalisation d'une évaluation rapide et de premier ordre de grandeur des digues fluviales. Toutefois, ce modèle ne permet pas de prendre en compte d'une manière explicite les incertitudes sur les données utilisées pour une analyse la performance des digues. Par ailleurs, le modèle n'a pas été conçu en prévision d'une évolution permettant l'évaluation d'une probabilité de défaillance des digues.

1.4 Approches probabilistes pour l'évaluation de la sûreté des digues

1.4.1 Analyse de risques en France : les études de dangers (EdD)

Opérationnellement en France, l'analyse de risques des digues fluviales se réalise par une Etude de Dangers (EDD) ayant comme but de réaliser une analyse probabiliste du niveau de sûreté lié à un risque de défaillance de ces ouvrages. Les Etudes de Dangers des digues comprennent une étude qualitative des dangers liés à l'ouvrage considéré, une analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement, une identification et caractérisation des potentiels de dangers et, une identification et caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence.

Le processus d'analyse des défaillances débute généralement par une analyse fonctionnelle dans la mesure où les systèmes d'endiguement sont rarement uniformes en termes de matériaux, de méthodes de construction, de géométrie ou de fiabilité (Tourment et *al.*, 2016). Cette première étape identifie les composants du système d'endiguement, les fonctions de ces composants (hydrauliques ou structurelles) ainsi que les tronçons fonctionnellement

homogènes de la digue (ILH, 2013). Le processus se poursuit avec l'analyse des modes de défaillance (Tourment et *al.*, 2016). Cette deuxième étape vise à identifier les scénarios de défaillance des systèmes d'endiguement pour faciliter l'analyse de la sécurité des systèmes d'endiguement et de la propagation des inondations (ILH, 2013). Enfin, l'estimation de la probabilité de survenue des scénarios de défaillance identifiés pour un ou plusieurs événements de sollicitation (Tourment et *al.*, 2016). En fonction d'une combinaison de données, cette troisième étape est exécutée au moyen de méthodes quantitatives reposant sur des jugements d'experts, des méthodes à base d'indices ou des modèles mathématiques à base d'équations physiques ou empiriques (ILH, 2013).

Pour améliorer l'élicitation des probabilités subjectives, la pratique actuelle procède par travail du panel d'experts visant à obtenir un consensus au sein du panel (Peyras, 2003). En pratique, les ingénieurs chargés de l'étude de dangers relèvent les principaux événements redoutés et les mesures de sécurité existantes pour déterminer une probabilité de défaillance par rapport à chaque mécanisme de rupture évalué sur chaque tronçon de la digue. La probabilité de défaillance totale prend en compte deux évaluations :

1- La probabilité d'occurrence des crues $p(a)$

De manière générale, les crues se caractérisent par leur probabilité d'occurrence. Par exemple, une crue centennale se définit statistiquement comme une crue ayant une probabilité annuelle d'apparition de 1/100 en termes de débit. Généralement, plusieurs probabilités d'occurrence des crues sont prises dans les études de dangers comme : 1) la crue centennale, soit d'une probabilité annuelle de 1/100 ; 2) la crue bi-centennale, soit d'une probabilité annelle de 1/200 et ; 3) la crue cinq-centennale, soit d'une probabilité annuelle de 1/500.

2- La probabilité d'occurrence des défaillances $p(b)$

Elle correspond à la probabilité de défaillance (surverse, rupture …) pouvant affecter les ouvrages d'endiguement. Opérationnellement dans les études de dangers des digues, cette probabilité se détermine par le jugement expert en tenant compte des informations disponibles sur l'ouvrage et du retour d'expérience sur des événements similaires ayant affectés d'autres ouvrages. Cette probabilité se détermine selon une grille d'analyse quantitative telle que la suivante :

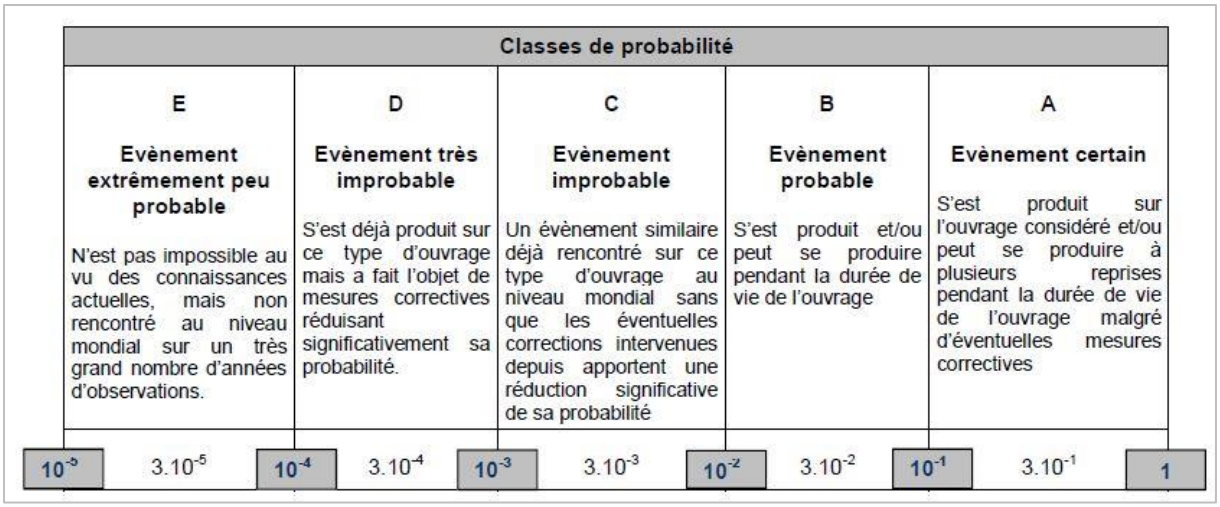


Figure 1-14. Grille d'analyse pour estimer la probabilité d'occurrence des défaillances

Une fois ces deux évaluations déterminées, la probabilité d'occurrence du scénario de défaillance est estimée en couplant les deux : si on nomme $p(a)$ la probabilité d'occurrence de la crue et $p(b)$ la probabilité d'occurrence d'une défaillance, alors la probabilité d'occurrence totale p_{Totale} du scénario de défaillance est $p_{Totale} = p(a) * p(b)$. Le tableau ci-dessous illustre un modèle classique pour présenter les résultats finaux d'une étude de dangers pour une digue découpée en *n* tronçons et par rapport aux quatre mécanismes de rupture.

Tableau 1-1. Modèle classique de présentation des résultats finaux d'une étude de dangers d'une digue

Mécanisme de défaillance	Gammes de crue	Probabilité d'occurrence = Pr (d'occurrence des crues) * Pr (d'occurrence des défaillances)			Cotation retenues		
		Tronçon 1	Tronçon 2	Tronçon n	Tronçon 1	Tronçon 2	Tronçon n
Rupture par surverse	Q 100						
	Q 200						
	Q 500						
Rupture par affouillement	Q 100						
	Q 200						
	Q 500						
Rupture par érosion interne	Q 100						
	Q 200						
	Q 500						
Rupture par glissement	Q 100						
	Q 200						
	Q 500						

En synthèse, les probabilités d'occurrences issues des études de dangers sont des probabilités subjectives déterminées à partir du jugement expert, basé sur la connaissance experte et en utilisant les données disponibles (géotechniques, hydrauliques, …) sur le linéaire de la digue à évaluer. Au final, la probabilité de défaillance d'une digue par rapport à un mécanisme de rupture correspond à la probabilité la plus élevée des probabilités subjectives calculées pour les différents tronçons de digue.

En synthèse de la pratique de l'évaluation des risques des digues dans les EDD en France, il apparaît que les probabilités d'occurrence des défaillances obtenues ne sont soumises à aucun traitement spécial visant à traiter les biais du jugement expert. Elles correspondent donc à des probabilités subjectives obtenues à dire d'experts.

1.4.2 Analyses de risques des digues à l'international

- Les approches britanniques MDSF2 et RELIABLE d'évaluation des digues

En Angleterre l'approche mise en œuvre au sein du système d'aide à la décision de modélisation des risques d'inondation (MDSF2) de l'Environnement Agency s'appuie sur les mêmes concepts et principes que ceux de la méthodologie française (Tourment et al., 2016). Au sein d'un système, les tronçons sont définis en fonction de leur géométrie et de leur état. Pour chaque tronçon de digue, une loi de probabilité, subordonnée à la sollicitation hydraulique (à savoir une courbe de fragilité) est définie. En Angleterre, des courbes de fragilité ont été définies pour un ensemble générique de structures de défense contre les inondations, notamment des remblais rocheux blindés, des parois verticales et des grèves. Chaque structure de défense comporte un ensemble de cinq niveaux d'état différents, avec des courbes différentes pour chaque niveau d'état.

Si ces courbes génériques sont disponibles à des fins d'analyse nationale, il apparaît cependant judicieux, dans le cas d'analyses régionales ou propres à un site, d'entreprendre une analyse de fiabilité plus ciblée à l'instar des grandes études régionales (estuaires de la Tamise et de l'Humber, par exemple). Dans cette optique, une analyse de fiabilité ciblée sur le système d'endiguement et plus détaillée a été entreprise au moyen d'un système logiciel créé dans le cadre du projet FLOODsite et intitulé RELIABLE. RELIABLE nécessite au préalable la mise en place d'un arbre de défaillances ainsi que de lois de probabilité afin de définir les propriétés des ouvrages étudiés (géométrie, propriétés du sol, etc.) (Tourment et *al.*, 2016).

- La méthode néerlandaise d'évaluation de la sécurité des systèmes d'endiguement

L'approche mise en œuvre par l'institut de recherche Deltares et l'institut gouvernemental Rijkswaterstaat pour assurer l'évaluation de la sécurité des systèmes néerlandais de défense contre les inondations s'appuie également sur les mêmes principes que ceux de l'approche française.

Les systèmes néerlandais de défense contre les inondations font régulièrement l'objet de tests par comparaison avec les normes légales de sécurité. Ils ont donné lieu à de nouvelles normes

de gestion des risques d'inondation qui devraient entrer en vigueur en 2017 (Den Heijer et F.L.M, 2012). Les normes actualisées sont exprimées sous la forme d'une probabilité maximale de défaillance autorisée pour la zone protégée. Un ensemble d'outils et de logiciels sera également mis en place. Les nouveaux outils d'évaluation probabiliste génèreront une probabilité de défaillance qui pourra être utilisée dans le processus de priorisation et de planification de la gestion des ouvrages (Tourment et *al.*, 2016).

- Un guide de reconnaissance international pour l'évaluation des digues fluviales : International Levees Handbook

L'International Levee Handbook (ILH), premier ouvrage de référence sur les digues de protection contre les inondations présente un processus général d'évaluation de la performance des digues. Ce processus se réalise par l'utilisation d'une ou plusieurs méthodes de traitement et de combinaison de données afin d'obtenir une évaluation de la performance du système d'endiguement, en fonction de sa fonction principale (protéger contre les inondations). Les méthodes d'évaluation de la performance sont basées sur une combinaison de données en utilisant : 1) le jugement d'expert, 2) les méthodes basées sur l'indice et, 3) les modèles mathématiques - modèles physiques / empiriques.

La forme finale des résultats dépend en grande partie de la méthode utilisée et également de la manière dont ils seront utilisés. Ils pourraient se présenter par plusieurs façons : 1) état-limite (charge limite), 2) probabilité conditionnelle de défaillance (pour une sollicitation donnée), 3) Courbe de fragilité (risque conditionnel de défaillance pour une gamme de sollicitations), 4) facteur de sécurité, 5) indice de performance présentée par une échelle semi-quantitative (échelle de 0 à 5 ou échelle de 0 à10) et, 5) évaluation qualitative verbale (très bon – bon – médiocre – mauvais – très mauvais). L'ILH propose lors de l'analyse de la performance des digues d'intégrer dans le processus d'évaluation les incertitudes sur les données d'entrées et le comportement de l'ouvrage afin de produire un résultat d'évaluation sous une forme probabiliste ou sous d'autres formes qualifiant les incertitudes.

A l'heure actuelle, certains mécanismes sont bien caractérisés en termes de modèles physiques (mécanisme de rupture par glissement) ou de modèles empiriques (mécanisme de rupture par érosion interne…) et d'autres mécanismes sont mal caractérisés par de modèles physiques ou empirique (mécanisme de rupture par affouillement, surverse) et pour lesquels une caractérisation quantitative doit encore être développée. Dans ce contexte, l'ILH souligne l'avantage d'utiliser le jugement expert pour évaluer la performance des digues face à ces mécanismes de rupture. Le jugement expert basé sur l'expérience individuelle et / ou collective permettra d'évaluer les différents scénarios de rupture (issus de la combinaison de plusieurs mécanismes de défaillance) lorsque l'évaluation par des approches quantitative est difficile à être réalisée. Aussi, il souligne l'importance de l'utilisation du jugement expert lors de l'évaluation de la fiabilité des digues car le jugement expert, permet de prendre en compte toutes les données disponibles sur l'ouvrage et toutes les analyses déjà faites pour évaluer l'état actuel de l'ouvrage, cela par conséquent permet aux gestionnaires à la fin d'une procédure d'évaluation de la performance de prendre une décision fiable sur l'état actuel ou futur de l'ouvrage.

Le processus d'évaluation de la performance par jugement expert est basé sur plusieurs types de données qui pourraient être catégorisé par leur nature permettant de clarifier sa relation avec les mécanismes de défaillance. Les différentes catégories de données sont : 1) données topographiques, 2) données géotechniques, 3) données hydrauliques, 4) données morpho-dynamiques, 5) données sur l'environnement des digues (y compris les enjeux dans la zone protégée) et, 6) données structurelles.

En synthèse, l'ILH souligne l'avantage et l'importance d'utiliser le jugement expert pour réaliser une analyse de performance des digues lorsque l'évaluation par des approches quantitative est difficile à être réalisée. Toutefois il ne préconise aucune démarche spécifique permettant une bonne utilisation et exploitation du jugement expert et surtout il ne présente aucune méthode permettant de traiter ce dernier qui est susceptible d'être entaché par des biais.

- Synthèse

Ce court panorama sur les différentes pratiques internationales utilisées pour l'évaluation de la performance des digues fluviales montre une similitude entre eux. Ces pratiques partagent le principe d'utilisation d'une analyse fonctionnelle de l'ouvrage permettant de caractériser en vue d'analyser les différentes fonctions de l'ouvrage afin de pouvoir prononcer *in fine* sur un risque potentiel de défaillance de ces ouvrages. L'ambition commune de ces pratiques, notamment les pratiques françaises, est d'avoir à la fin une présentation sous forme probabiliste de la performance et de la fiabilité des digues. Dans ce contexte le jugement expert se présente comme un outil pertinent, adopté et préconisé par l'ILH.

Par rapport aux pratiques internationales, la pratique française a fait l'objet d'un développement énorme et important au cours de ces dernières années et surtout dans l'aspect de l'utilisation du jugement expert pour l'évaluation de la fiabilité des digues et dans l'aspect de la prise en compte des incertitudes sur les données d'entrées des digues. L'ambition de cette pratique et de mettre en place une méthode scientifique permettant d'un côté de répondre aux réglementations relatives à la sûreté des ouvrages hydrauliques et d'un autre côté, de produire un outil opérationnel simple et fiable pour les ingénieurs et les gestionnaires des ouvrages pour l'évaluation de leur fiabilité structurelle dans un contexte incertain.

1.4.3 Méthode probabiliste d'évaluation de la performance des digues (Vuillet, 2012)

Vuillet (2012) propose un modèle d'évaluation de la performance des digues probabiliste apportant une aide aux ingénieurs pour le diagnostic des ouvrages vis-à-vis des principaux mécanismes de rupture connus. Dans la continuité des travaux de Serre (2005), la démarche s'appuie en premier lieu sur une modélisation fonctionnelle des mécanismes de rupture des digues en remblai homogène, puis met en œuvre des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement et du Raisonnement Qualitatif : Analyse Fonctionnelle, Analyse des Modes des Défaillances et de leurs Effets, ainsi que les graphes causaux.

La mise en œuvre de ces méthodes a permis une décomposition du système « digue », l'identification des fonctions de chaque composant des ouvrages (talus, corps de digue, crête, etc.), ainsi que les causes et les effets de leurs défaillances. La méthode propose de modéliser les mécanismes de rupture par des **indicateurs de performance** (IP) déterminant la performance des digues vis-à-vis de leurs mécanismes de défaillance en combinant plusieurs critères d'évaluation. Les **critères d'évaluation** (Ci) correspondent à des éléments d'aide à la décision utilisés pour évaluer la performance des composants des digues, à savoir la réalisation des fonctions associées aux composants. Ils sont évalués par des **indicateurs d'état** (IE) correspondant aux éléments fondamentaux qui exposent en détail les informations à prendre en considération pour évaluer chaque critère. Ils sont interprétés ou déduits à partir de données telles que les mesures, les observations, les calculs (Vuillet *et al.*, 2012).
Chaque indicateur de performance combine les séquences de défaillance identifiées lors de la construction du modèle fonctionnel selon des opérateurs d'agrégation ou des tables de règles expertes construites avec un groupe d'ingénieur spécialisés dans la sûreté des digues fluviales : géotechniciens, ouvrage hydrauliques, hydraulique fluviale et morpho dynamique.

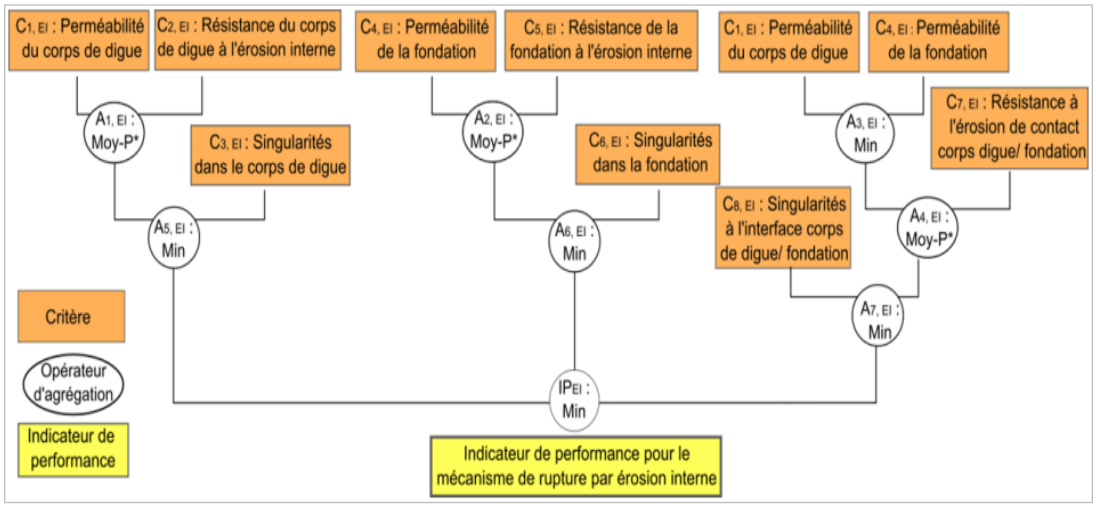


Figure 1-15. Indicateur de performance pour le mécanisme de rupture par érosion interne (Vuillet *et al.*, 2012)

Les critères et les indicateurs de performance des digues sont évalués selon une double échelle d'évaluation (Figure 1-16) :

- une échelle de valeurs qualitative allant de inexistant / inacceptable à bon ;
- une échelle continue sur l'intervalle [0,1] faisant correspondre des valeurs numériques à chaque modalité qualitative.

Figure 1-16. Echelle d'évaluation de la performance des digues (Vuillet *et al.*, 2012)

Cette étude propose aussi une démarche de prise en compte des incertitudes des données d'entrée du modèle dans le cadre des probabilités subjectives. L'ingénieur évalue la valeur la plus vraisemblable de chaque critère ainsi qu'un intervalle d'incertitude. L'évaluation des critères est ensuite modélisée selon des fonctions de densité de probabilité. Les incertitudes sont ensuite propagées dans le modèle au moyen de simulations de Monte-Carlo, selon la formulation du modèle déterministe d'évaluation de la performance des digues. Elle aboutit à une distribution empirique pour l'indicateur de performance du mécanisme étudié (Figure 1-17).

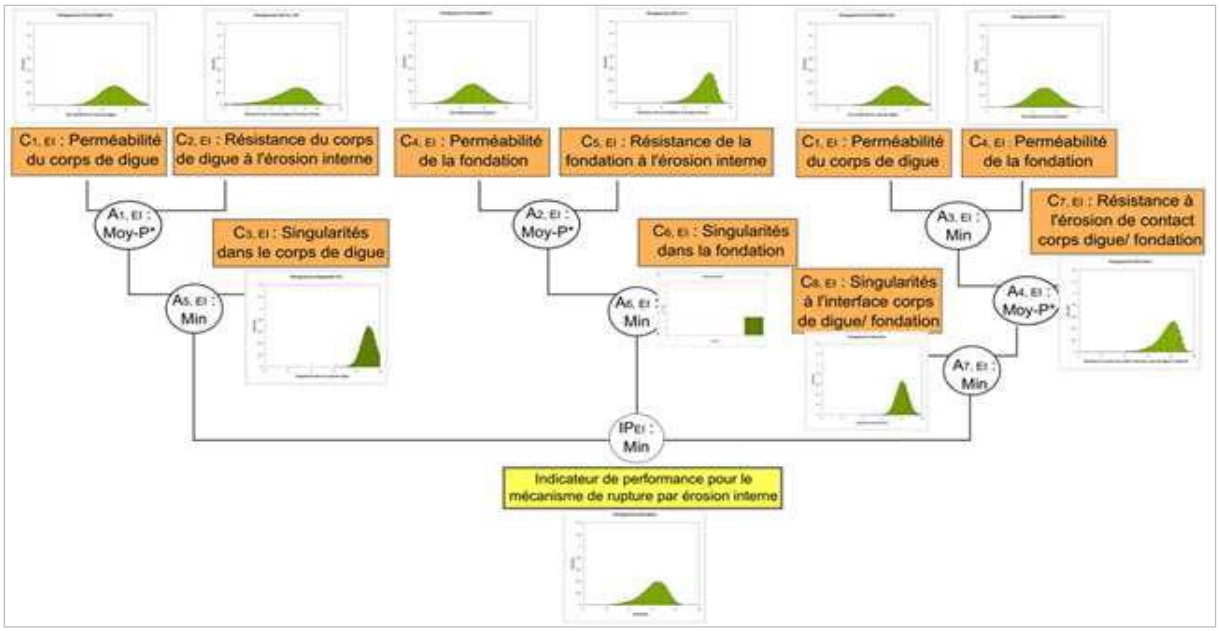


Figure 1-17. Propagation des incertitudes des critères par simulations de Monte-Carlo pour l'indicateur de performance érosion interne (Vuillet, 2012)

En synthèse, le modèle probabiliste développé par Vuillet (2012) présente plusieurs avantages intéressants. Tout d'abord il permet de de prendre en compte les incertitudes affectant l'évaluation de la sûreté des digues selon un format probabiliste familier aux ingénieurs (Vuillet *et al*., 2013). Aussi, il propose une démarche spécifique pour le traitement des biais en phase d'élicitation avec un manuel dédié aux experts (Vuillet, 2012 ; cf. § 3.3). Enfin, la démarche propose, via des analyses de sensibilité, une aide à la décision pour l'ingénieur en charge d'expliciter son diagnostic et de fournir des préconisations (Vuillet *et al*., 2016). Toutefois, bien que probabiliste ce modèle demeure semi-quantitatif. De par la nature de son échelle d'évaluation il ne permet pas de raisonner en probabilité de rupture des ouvrages. En outre, il ne permet pas d'identifier, et de réduire explicitement les biais experts, via une évaluation de la qualité des estimations expertes par exemple. Enfin, le modèle repose sur l'utilisation par un seul expert ou un consensus d'experts. Il ne permet pas de combiner des avis experts susceptibles de ne pas converger totalement, surtout lorsque les experts ne sont pas du même domaine ou sujet à des biais différents.

1.5 Synthèse

Nous avons présenté un état de l'art non exhaustif des méthodes d'évaluation de la performance et de la fiabilité des digues fluviales.

Les approches ingénieries d'évaluation des digues demeurent essentiellement qualitatives, l'évaluation des digues se fait à partir de grilles qualitatives. Elles sont produites sur des tronçons homogènes, sachant que la notion de tronçon homogène n'est pas définie avec précision et que le découpage est établi par expertise. Ces évaluations restent déterministes et ne prennent pas en compte les incertitudes des données utilisées, ni ne rendent compte de leurs impacts sur le niveau de performance déterminé.

Les approches fonctionnelles d'évaluation des digues présentent elle-même plusieurs limites : elles sont basées essentiellement sur les données visuelles et restent limitées au diagnostic rapide. Elles seront peu pertinentes pour le diagnostic approfondi, nécessitant de mobiliser des données complètes et de différentes natures (visuelles, géophysiques, géotechniques), elles sont de nature déterministe et qualitative, elles ne permettent pas de modéliser les incertitudes inhérentes aux données des digues et au jugement expert.

Les approches probabilistes d'analyse de risques de défaillance des digues développées, et notamment le modèle probabiliste de Vuillet (2012) ne permettent pas d'estimer directement la probabilité d'occurrence de défaillance potentielle des ouvrages et ne permettent pas de prendre en compte les cas de défaillances rares des ouvrages. Egalement, les résultats issus des études de dangers sont entachés par des biais importants puisque le calcul de la probabilité de défaillance est basé sur le jugement expert sans aucun traitement spécifique. Au final la probabilité délivrée par ce type d'analyse est un résultat par nature subjectif, et donc peu fiable.

In fine, c'est essentiellement par expertise qu'est réalisée l'évaluation de la performance des digues, sur la base de la connaissance de l'état structurel des ouvrages dans un contexte d'incertitude du fait du manque de données et, dans un contexte de complexité des ouvrages et de leurs mécanismes de défaillance. L'évaluation délivrée par l'expert peut parfois conduire à des valeurs fortement biaisées. Le jugement en matière de risque exprimé subjectivement par les individus repose sur des raisonnements informels -les heuristiques- susceptibles de rendre leurs évaluations probabilistes finales biaisées. La construction d'une démarche complète permettant l'identification et la réduction des biais susceptibles d'altérer les évaluations à dires d'experts demeure donc un enjeu de première importance. Dès lors, le chapitre suivant a comme but de présenter les différents éléments et principes liés au jugement expert et mettre en évidence la problématique associée.

2 Experts, jugement expert et biais

L'avis d'expert correspond à une représentation instantanée de la connaissance de l'expert en réponse à une question. Cette représentation est instantanée car elle peut être changée lorsque l'expert obtient des nouvelles informations (Meyer et Booker, 1993). Dans la littérature scientifique l'avis d'expert prend le terme de « jugement expert » qui est selon Ortiz *et al.* (1991) « *l'expression de l'opinion, basée sur la connaissance et l'expérience, que l'expert fait en réponse à un questionnement* ». Plus spécifiquement, le jugement expert représente l'état de la connaissance de l'expert au moment de sa réponse à la question (Ortiz et *al.*, 1991).

Dans le domaine de l'analyse des risques, les réponses des experts peuvent être exprimées sous formes quantitatives : quantité physique, probabilité, distribution de probabilités ou, sous forme qualitative puis être traduites, selon des transformations spécifiques, sous forme quantitative pour les utiliser dans l'analyse des risques (Meyer et Booker, 1993).

Se servir du jugement expert signifie s'adresser à un ou plusieurs experts pour effectuer une analyse de risques ou de fiabilité d'un système complexe dont le comportement réel de défaillance n'est pas soumis à des lois connues ; ou pour évaluer dans un contexte incertain sur les données un mécanisme de rupture complexe d'un système face à un risque ; ou pour compiler plusieurs données provenances de plus sources d'analyse quantitatives ainsi que qualitatives afin de pouvoir opter pour une décision finale… En général, on se sert du jugement expert dans les analyses des risques, lorsque les données de retours d'expérience sont insuffisantes (en termes de quantité ou de qualité) voire inexistantes. Et, lorsque la quantité de données ne permet pas d'effectuer une analyse statistique ou probabiliste précise et cohérente des éléments considérés (Muffat, 2005). Dans ce cas, le jugement expert se présente comme une seconde source de connaissance, d'information et de donnée. Les experts expriment, sous forme d'une distribution de probabilité dite subjective, leur propre avis pour une conséquence de risque pouvant prendre différentes valeurs.

Ce chapitre a comme objectif de détailler, d'un côté les définitions et les principes autour de l'expert et, d'un autre côté de mettre en évidence les différentes catégories et typologies des biais susceptibles d'altérer les évaluations expertes de la sûreté des digues fluviales.

2.1 Experts et panel d'experts

2.1.1 L'expert

Les experts sont des personnes qui détiennent le savoir et sont considérés comme une source de données aussi bien qualitative que quantitative. Plusieurs définitions existent pour déterminer ce qu'est un expert et ce qui le différencie de la population générale. Wood et Ford (1993) résument bien ce qu'on entend par « expert ». Ils décrivent un expert comme « *une personne capable de résoudre des problèmes en se basant sur les données d'un cas spécifique, sur les principes généraux du domaine, sur des stratégies de résolution connues*

dans le domaine et sur les connaissances procédurales ou des relations ». Pour Meyer et Booker (1993) un expert est « *une personne qui a une forte connaissance d'un domaine particulier, il est reconnu comme étant qualifié pour répondre à des questions par ses pairs ou les personnes menant l'analyste* ». Pour Pietrocatelli (2008) un expert est « *une personne qui doit avoir plus d'expérience et de compétence dans son domaine d'expertise que la population générale* ». En d'autres termes, nous pouvons définir un expert comme une personne disposant de compétences spécifiques dans un domaine, et ayant de ce fait la capacité de créer, d'imaginer et de trouver des liens entre les différentes données (anciennes et nouvelles) de risques, que le retour de l'expérience à lui seul ne permettrait pas, et ce dans le but de trouver des réponses et des solutions plus pertinentes pour résoudre l'effet d'un risque ou, du moins anticiper un comportement de défaillance complexe voire inconnu d'un système de protection contre un risque.

2.1.2 Panel d'experts

Un « panel d'experts » désigne un ensemble d'experts spécialistes rassemblés pour confronter leurs avis, leurs connaissances, leur expertise, dans le but de se mettre d'accord sur un questionnement aboutissant à une estimation précise. La construction d'un panel d'experts n'est pas un processus arbitraire. Il doit avoir des caractéristiques spéciales pour cette construction. Morgan et Henrion (1990) considèrent deux caractéristiques importantes lors du choix d'experts, l'interdisciplinarité et la diversité d'opinions :

- L'interdisciplinarité car il est de plus en plus difficile de résoudre un problème en se basant sur l'expertise d'un seul domaine scientifique. La complexité croissante des questions d'évaluation des risques ainsi que la spécialisation de plus en plus pointue des connaissances des experts justifient le besoin d'avoir des experts de champs de compétence différents et complémentaires.
- De plus, pour s'assurer d'avoir des opinions représentant tous les aspects du problème et permettant de proposer une bonne solution pour le résoudre, la diversité d'opinions est préconisée.

Le panel d'experts, ou encore le « *groupe d'évaluation* ou *groupe de jugement* », présente certains avantages par rapport aux évaluations individuelles d'un seul expert. En général, si les experts de ce groupe exploitent les probabilités classiques d'une part, et disposent d'informations correctes reflétant les caractéristiques d'un ouvrage étudié d'autre part, leur jugement consensuel s'avère meilleur qu'un jugement individuel (Burne et *al.*, 2010). Toutefois, les jugements de ce panel d'experts peuvent être biaisés car ils risquent d'être entachés par des préjugés individuels ou par des estimations prudentes. Notamment lorsqu'un panel d'experts doit se prononcer sur l'évaluation de probabilités faibles, leurs évaluations peuvent être fortement biaisées (Krinitzsky, 1993 ; Bottom et *al.*, 2002).

Pour bien évaluer une probabilité subjective à dires d'experts, les experts doivent recevoir une « formation » pour l'estimation de probabilités, afin que leurs jugements soient le moins biaisé possible. Un autre objectif est d'assurer une réelle compréhension des principes des

probabilités, particulièrement des probabilités cumulatives et des probabilités des extrémités des distributions (O'Hagan et *al.*, 2006).

Dans le même contexte, O'Hagan *et al.* (2006) souligne plusieurs difficultés lors d'une élicitation à dires d'experts : désaccords et rivalités possibles ; difficulté de combiner divers champs d'expertise ; incompréhension de certains champs d'expertise ; incompréhension des probabilités ; incohérence des estimations probabilistes élicitées ; biais inconscients, subjectivité ; influence inégale de différents experts ; pressions sociopolitiques ; biais venant d'attitudes face à la gestion du risque.

2.1.3 Construction d'un panel d'experts

Un panel d'experts réunit plusieurs spécialistes indépendants et reconnus dans les domaines correspondant au problème évalué. Le panel produit collectivement un jugement sur la valeur du problème évalué et de ses effets, où inversement, chaque expert, séparément, donne son jugement sur la valeur du problème évalué et de ses effets ; ces différents jugements feront l'objet d'une agrégation mathématique afin de déterminer une seule valeur finale. Le panel d'experts est un outil permettant de disposer rapidement et à faible coût d'un jugement global intégrant : 1) les principales informations connues sur le problème et 2) les multiples expériences antérieures et extérieures liées au problème évalué (Commission européenne, 1999).

Le panel d'experts est un groupe de travail spécialement constitué et réuni à l'occasion d'évaluation ou de jugement d'un problème spécifique. On fait appel aux panels d'experts pour dégager un consensus sur des questions complexes et mal structurées pour lesquelles, les autres outils (analytiques, expérimentaux…) ne permettent pas d'obtenir des réponses fiables ou crédibles (Commission européenne, 1999). Par ailleurs, le processus de la construction d'un panel d'experts, ayant comme objectif d'avoir un jugement expert par consensus, peut être divisé en quatre étapes suivantes (Commission européenne, 1999) : 1) identification d'une liste d'experts potentiels, 2) sélection des experts, 3) investigations, et, 4) synthèse.

- Etape 1 - Identification d'une liste d'experts potentiels

Cette étape consiste à sélectionner les membres du panel qui doivent être des spécialistes reconnus dans au moins un des champs concernés par le problème d'évaluation. Ils doivent avoir une large expérience du domaine et être indépendants des commanditaires qui gèrent la tâche d'évaluation. Ils doivent, par ailleurs, avoir la disponibilité et la volonté de s'impliquer dans l'évaluation.

- Etape 2 - Sélection des experts

Le panel peut être généralement composé de six à douze membres appartenant aux différents champs d'expertise. L'objectif est d'avoir un panel d'experts ayant une diversité de spécialités pour mieux répondre aux problèmes du contexte d'évaluation.

- Etape 3 – Investigations

Les experts se réunissent régulièrement pour réaliser la tâche demandée selon un plan de temps bien déterminé au préalable. Afin de donner leurs avis sur le problème d'évaluation, les

experts doivent examiner et consulter la base de données liée au problème d'évaluation: 1) la documentation liée au problème, 2) les rapports d'activités, 3) les études préalables réalisées, 4) les enquêtes et 5) les publications.

Dans un certain cas spécial, le panel pourrait réaliser des visites sur le terrain, individuellement par chaque expert mais, il est préférable de les réaliser en binômes pour limiter autant que possible les biais susceptibles d'entacher leurs jugements.

- Etape 4 – Synthèse

Le panel produit un rapport et formule des conclusions et des recommandations acceptées collectivement. Si les points de vue divergent, le panel discute jusqu'à obtention d'un consensus. En cas de désaccord, il peut être utile d'exprimer la conclusion majoritaire et d'annexer un commentaire de l'expert minoritaire.

2.1.4 Avantages et limites de l'utilisation du jugement expert

En analyse de fiabilité, le besoin de prendre en compte des événements catastrophiques rares, parfois jamais observés, nécessite l'utilisation de probabilités dites subjectives, données à dire d'experts. Ici, le jugement expert présente des avantages puisqu'il est la seule source de données et la seule solution dans un contexte incertain pour obtenir une estimation quantitative du risque. Toutefois il présente quelques inconvénients :

1. les évaluations expertes de la fiabilité structurelle d'ouvrage de génie civil sont sujettes à des incertitudes et sont susceptibles d'être entachées par des biais. Ces derniers ont tendance à être particulièrement présents lorsqu'il s'agit de l'évaluation de probabilités rares de défaillance.
2. les experts n'ont pas toujours les mêmes compétences ni les mêmes niveaux d'expériences, et peuvent avoir diverses spécialités et divers points de vue concernant le problème évalué. Ces différences sont également génératrices de biais importants, lors des évaluations de la fiabilité par plusieurs ingénieurs.

Dans ce contexte, la définition des biais, les différentes catégories et typologies des biais du jugement expert et leurs façons de se présenter dans le domaine des digues seront développées ci-après.

2.2 **Les biais**

Malgré leurs compétences, leurs connaissances approfondies et leurs expertises, les experts ne sont pas à l'abri de biais propres aux opinions et aux jugements probabilistes (Procaccia et *al.*, 2003 ; O'Hagan et *al.*, 2006). En effet, il y a toujours une transformation qui peut engendrer une différence entre la connaissance détenue et la façon dont elle est restituée et exprimée (Bateson, 1979). Ces différences s'expriment principalement par la présence de biais pouvant intervenir à différents moments du processus d'élicitation et d'analyse, si des précautions ne sont pas prises (Kahneman et *al.*, 1982).

Tout le monde, incluant les experts, utilise des heuristiques qui peuvent amener à un jugement biaisé. Les économistes Tversky et Kahneman (1974) définissent **les heuristiques** comme « *des raccourcis mentaux qui permettent de prendre en considération seulement une partie des faits pour accélérer le processus de la pensée et émettre une option probabiliste, contrairement aux algorithmes mathématiques rigoureux mais longs* ». Pour les psychologues Yachanin et Tweney (1982) **les heuristiques** « *sont des règles de raisonnement qui conduisent à une simplification du problème et qui permettent de le résoudre rapidement mais pas toujours correctement* ». Donc les heuristiques aident les experts à : 1) trouver rapidement une solution ou 2) donner une estimation approximative ou 3) évaluer un comportement inconnu. Ces derniers semblent pour les experts des résultats très convenables et tolérables, mais en réalité ils contiennent des distorsions entre eux et le contexte réel. Ces heuristiques rendent les jugements d'experts biaisés si ceux-ci ne s'avisent pas de les éviter ou de les limiter.

La littérature cognitive fait la relation entre les heuristiques et les biais. Elle considère les heuristiques comme génératrices de biais susceptibles d'altérer les aptitudes d'un expert à éliciter sa réelle opinion (kahneman et *al.*, 1982). L**es biais** « *sont des sources d'altération de l'expertise, comme un écart par rapport à la vraie valeur* » (Muffat, 2005). Pour les psychologues Yachanin et Tweney (1982) **les biais** sont des « *distorsions entre la façon dont l'expert raisonne et celle qu'ils devraient adopter pour assurer le mieux possible la validité de ses inférences et conclusions* ». Ces biais sont depuis peu le centre d'intérêt de plusieurs recherches scientifiques (Clemen et Lichtendahl, 2002 ; Pietrocatelli, 2008 ; Vuillet, 2012) utilisant les avis d'experts comme moyen de traiter l'incertain aléatoire, épistémique et la pénurie de données dans plusieurs domaines comme la statistique, la santé et le génie civil. Ces recherches font référence à plusieurs types de biais : la disponibilité, la représentation, la sur-confiance, l'ancrage (Tversky et Kahneman, 1974 ; Morgan et Henrion, 1990 ; O'Hagan et *al.*, 2006).

2.2.1 Les différentes catégories de biais

Meyer et Booker (1993) distinguent quatre catégories principales de biais heuristiques : les biais cognitifs (les biais de l'expert), les biais motivationnels (les biais de situation), les biais de l'analyste et les biais techniques :

- Les biais cognitifs (les biais de l'expert) : ils sont dus aux limites intellectuelles et plus généralement à la tendance à simplifier ou à effectuer des raccourcis lorsque le problème est trop complexe.
- Les biais motivationnels (les biais de situation) : ils sont principalement induits par la position hiérarchique de l'expert ou son attente envers l'étude. L'expert ne reporte pas sa connaissance actuelle en raison de pressions hiérarchiques ou encore l'acceptabilité possible de ses réponses.
- Les biais de l'analyste : ils interviennent notamment dans le choix des experts ou dans l'interprétation faite des réponses.
- Les biais techniques : ils dépendent généralement de la qualité des questionnaires, du formulaire de questionnement et des outils utilisés pour le recueil des avis.

Particulièrement, nous nous intéressons, dans cette recherche relative à l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales, aux biais cognitifs entachant les jugements experts. Pour cela nous nous limitons dans la suite à l'examen des différents types de biais cognitifs.

2.2.2 Typologie des biais cognitifs

En psychologie cognitive, il existe plusieurs types de biais qui sont particulièrement connus et utilisés lors d'un processus d'élicitation de probabilités. Ces biais ont été pris en compte dans les travaux de Vuillet (2012), concernant l'évaluation de la performance des digues fluviales. Ces quatre types sont les biais de : disponibilité, représentation, ancrage et sur-confiance. Ils peuvent souvent se combiner, se confondre ou se renforcer mutuellement.

A. Le biais de disponibilité

Le biais de disponibilité correspond à un raccourci mental tenant compte seulement des faits les plus récents ou surestimant leur importance en raison de leur « disponibilité » en mémoire (O'Hagan et *al.*, 2006). Autrement dit, c'est une heuristique qui élimine les faits et les informations plus anciens, en ne cherchant pas assez profondément et systématiquement dans le passé.

Exemple général : les médias peuvent rapporter des faits concernant une maladie de façon fréquente et répétitive qui donne l'impression que la probabilité de contracter la maladie est plus élevée qu'en réalité (Pietrocatelli, 2008).

Exemple concernant l'interprétation du biais de disponibilité lors de l'évaluation du niveau de sûreté des digues : l'ingénieur a tendance à donner trop d'importance à un mécanisme de rupture dans le cadre d'une catastrophe largement relayée par les médias (Vuillet, 2012).

B. Le biais de représentation

Le biais de représentation correspond à une erreur d'estimation du degré de correspondance entre un échantillon et une population (Kahneman et *al.*, 1982). Autrement dit, une heuristique de représentation consiste à estimer la probabilité d'un événement en se basant sur la probabilité d'un autre événement qui lui est associé ou qui lui est similaire.

Exemple général : l'extrapolation à la population générale des données d'un événement associé à un échantillon de personnes est un exemple d'utilisation de l'heuristique de représentation. En recherche, il s'agit souvent du biais qui consiste à associer à l'ensemble d'une population les observations concernant une population limitée (Pietrocatelli, 2008).

Exemple concernant l'interprétation du biais de représentation lors de l'évaluation du niveau de sûreté des digues : l'ingénieur néglige l'impact des conduites traversantes sur la sécurité des ouvrages, alors qu'un pourcentage important de ruptures de digue est imputable à ce type de phénomènes (Vuillet, 2012).

C. Le biais d'ancrage

Le biais d'ancrage correspond à un biais qui se manifeste lorsque l'expert se laisse trop influencer par une première évaluation spontanée du risque, qu'il essaie d'ajuster dans un deuxième temps. Autrement dit, une heuristique d'ancrage peut se manifester quand les personnes s'attachent à leur première opinion liée à leur propre expérience concernant un événement quelconque sans intégrer les nouvelles informations pertinentes sur l'événement concerné.

Exemple général : on demande à des personnes de positionner le curseur d'une roue indiquant par un score de 1 à 100 le pourcentage des pays africains parmi les membres de l'ONU. Si au démarrage de l'expérience, on positionne le curseur sur 10, la moyenne des ajustements est 25, c'est-à-dire que les personnes interrogées estiment que 25% des pays membres de l'ONU sont africains. Si au démarrage de l'expérience on positionne le curseur sur 65, la moyenne des ajustements est alors 45 (Tversky et Kahneman, 1982).

Exemple concernant l'interprétation du biais d'ancrage lors de l'évaluation du niveau de sûreté des digues : Après consultation de documents d'archives, l'ingénieur évalue un critère selon la modalité la plus vraisemblable correspondant à son premier jugement, puis ne parvient pas à l'ajuster à la lumière d'autres éléments nuançant ou contredisant cette appréciation (Vuillet, 2012).

D. Le biais de sur-confiance

Le biais de sur-confiance correspond à un biais qui conduit l'expert à minimiser l'incertitude de ses évaluations. A contrario, le biais de pessimisme conduit l'expert à éliciter des distributions insuffisamment informatives.

Exemple concernant l'interprétation du biais de sur-confiance lors de l'évaluation du niveau de sûreté des digues : un ingénieur trop confiant dans la représentativité d'un sondage minimise l'incertitude liée à la variabilité de disposition des matériaux (Vuillet, 2012).

2.3 Synthèse

Lorsque les données de retours d'expérience, les données statistiques ou les mesures physiques sont faiblement disponibles, la réalisation d'une évaluation probabiliste, basée sur des modèles statistiques demeure impossible. Dans ce cas-là, les évaluations expertes peuvent constituer la seule source de données disponible, le jugement expert reflétant d'une façon instantanée la connaissance de l'analyste vis-à-vis d'un contexte incertain de risques. Cependant, ces derniers reposent sur des heuristiques permettant à l'expert de simplifier le problème étudié, et d'arriver rapidement à une évaluation ou à une estimation sans qu'elle soit optimale. Ces heuristiques, à leur tour, génèrent des biais déformant l'avis expert

Dès lors, les heuristiques et les biais se présentent comme des verrous et des défis aux ingénieurs, dans le contexte d'évaluation probabiliste de la fiabilité des ouvrages de génie civil, plus particulièrement les ouvrages de protection contre les inondations. Ces ouvrages présentent une difficulté pour évaluer leur fiabilité vis-à-vis des événements d'occurrence rare et forte puisque, d'un côté, plusieurs mécanismes de défaillance (érosion interne –

affouillement – surverse) sont difficiles à être modélisés analytiquement afin de déterminer une probabilité objective de défaillance, et, d'autre côté ces ouvrages sont entachés par des incertitudes :

- des incertitudes épistémiques : 1) sur les données (manques de données statistiques), et 2) sur les mécanismes de défaillance.
- des incertitudes aléatoires dues aux variétés naturelles des matériaux constituant l'ouvrage.

Dans le domaine de l'évaluation de la fiabilité des digues, le recours au jugement expert est indispensable. Ainsi la prise en compte du traitement de ces biais est nécessaire et une démarche permettant de les corriger et/ou de les réduire demeure un besoin de premier ordre. Dans ce contexte, il est intéressant de mettre en évidence la façon dont le jugement expert est utilisé dans le domaine des digues ainsi que les différentes manières déjà proposées pour le traiter. Pour cela, une présentation des pratiques actuelles du traitement et de recueil du jugement expert mis en œuvre pour l'évaluation des digues fluviales fait l'objet du chapitre suivant « *le traitement du jugement expert mis en œuvre pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques*. »

3 Traitement du jugement expert mis en œuvre pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques

Dans le domaine des ouvrages hydrauliques, le jugement expert est par défaut une méthode très utilisée pour la réalisation des diagnostics, analyses de risques et des études d'évaluation du niveau de sûreté. Dans ce chapitre, nous proposons un panorama succinct des mises en œuvre de méthodes pour le traitement du jugement expert, notamment issues du domaine statistique et économique, ainsi que ce qui existe pour le domaine des ouvrages hydrauliques.

3.1 Traitement du jugement expert dans la littérature statistique

La littérature du génie civil est moins riche en méthode de traitement du jugement expert que la littérature statistique. Les méthodes issues de cette dernière ont fait l'objet d'application dans plusieurs domaines comme l'économique (Lichtendahl et *al.*, 2013), l'actuariat (Pigeon, 2008), l'énergie (Shlyakhter et *al.*, 1994), l'aérospatial (Cooke, 1991 ; Clemen et Lichtendahl, 2002). Chaque méthode a été développée pour répondre à des questions issues de l'utilisation du jugement expert comme : 1) la pondération des avis expert, 2) l'agrégation des différents avis experts, 3) le dé-biaisage des avis experts. A côté de ces méthodes ayant comme objectif principal le traitement du jugement expert, d'autres méthodes se sont focalisées sur le développement de meilleurs protocoles/ modalités pour le recueil des avis experts dans plusieurs domaines comme l'ingénierie (Vick, 2002), l'économie (Soll et Klayman, 2003) et la psychologie (Koehler et harvey, 2004), dans l'objectif d'avoir un jugement expert plus précis et le moins biaisé possible.

Quelle que soit l'origine ou le domaine d'application de ces méthodes, nous proposons de les catégoriser selon trois modalités principales : 1) méthodes d'élicitation des avis experts, 2) méthodes de calibration des avis experts et, 3) méthodes de dé-biaisage des avis experts. Les principes généraux de ces méthodes que nous détaillons dans la partie II de ce mémoire sont les suivants :

- Les méthodes d'élicitation des avis experts ont comme objectif de recueillir les avis experts et de diminuer autant que possible la présence de biais, contextuels ou relatifs à la traduction d'un heuristique plus ou moins abstrait en une grandeur particulière (valeur absolue, ratio, probabilités, etc.);
- Les méthodes de calibration des avis experts ont comme objectif d'estimer la pertinence des avis experts en vue de les pondérer, puis de les agréger pour avoir *in fine* un seul avis calibré et pondéré ;
- Les méthodes de dé-biaisage ont comme objectif de corriger et traiter les biais du le jugement expert éventuellement biaisé par des biais cognitifs.

Dans le contexte des ouvrages hydrauliques, les limites entre une phase d'élicitation des dires d'experts (le recueillement du jugement expert) et leur traitement associé, comme la calibration et le dé-biaisage, sont loin d'être explicites et clairs. Plusieurs pratiques scientifiques liées à ces ouvrages ont été développées et appliquées pour l'évaluation de leurs niveaux de sûreté, nous les présentons ci-après.

3.2 Traitement et élicitation quantitatifs des dires d'experts mis en œuvre pour l'évaluation de la sûreté des ouvrages hydrauliques

Peyras (2010) propose dans ses travaux concernant le diagnostic et l'analyse de risques liés au vieillissement des barrages de se servir du retour d'expérience et d'une collection d'historiques de vieillissement pour analyser qualitativement une mesure de l'occurrence de la perte de performance d'une fonction d'un barrage en exploitation. Dans ce travail, afin de rattacher à la prévision des experts une probabilité d'occurrence de perte de performance, plusieurs experts du domaine ont été sollicités. Ils étaient interviewés via un bref questionnaire, accompagné d'un exposé oral du contexte et d'une mise en situation par des exemples :

« *Vous êtes en situation d'expertise sur un barrage en service, présentant des désordres susceptibles d'être évolutifs. Dans la conclusion de votre rapport, vous indiquez que ces évaluations sont susceptibles d'aboutir à telle dégradation (ou événement) dans tel délai, avec une probabilité que vous qualifiez de très forte, forte, moyenne, ou faible. Dans votre esprit, quelles valeurs quantitatives de probabilité faites-vous correspondre à :*

- *Une probabilité très forte d'occurrence d'un événement (sur une période donnée) ?*
- *Une probabilité forte d'occurrence d'un événement (sur une période donnée) ?*
- *Une probabilité moyenne d'occurrence d'un événement (sur une période donnée) ?*
- *Une probabilité faible d'occurrence d'un événement (sur une période donnée) (Peyras, 2010)* ? **»**

Ce travail a permis de proposer une grille qualitative du traitement des dires d'experts présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3-1. Grille d'analyse des dires experts (Peyras et *al.*, 2010)

Appréciation experte de la probabilité d'occurrence	Traitement quantitatif des dires d'experts
« très probable »	0.60
« probable »	0.40
« moyennement probable »	0.20
« peu probable »	0.10

Appréciation experte de la probabilité d'occurrence	Traitement quantitatif des dires d'experts
« très peu probable »	0.01
« extrêmement peu probable	0.001

Les résultats finaux seront comparables aux probabilités d'occurrence associées aux dires d'experts issues de la littérature (Lichtenstein et *al.*, 1977). Ces probabilités (tableau ci-dessous) ont en outre été utilisées dans certaines références relatives à l'analyse de risque des barrages (CEA, 2000 ; Vick, 1997).

Tableau 3-2. Transcription de descriptions expertes de l'incertain (CEA, 200)

Verbal description	Probability Equivalent	Low	High
Virtually impossible	0.01	0.00	0.05
Very unlikely	0.10	0.02	0.15
Unlikely	0.15	0.04	0.45
Fairly unlikely, rather unlikely	0.25	0.02	0.75
Fair chance toss-up	0.5	0.25	0.85
Usually, good chance, probable, likely	0.75	0.25	0.95
Quite likely	0.80	0.30	0.99
Very likely, very probably	0.90	0.75	0.99
Virtually certain	0.99	0.9	1.00

En synthèse, les procédures proposées dans cette recherche se limitent à interpréter et déterminer les probabilités données par les experts par rapport à des valeurs fixes quantitatives. Dès lors, les points faibles de cette approche sont : 1) les probabilités subjectives fournies par les experts ne sont soumises à aucun protocole spécifique pour les recueillir dans un objectif de traitement des biais post élicitation, 2) la pondération faite pour réaliser l'agrégation des probabilités experts est purement subjective ; elle ne permet pas d'évaluer la justesse et la précision de l'avis expert et, 3) le résultat final correspond à une probabilité agrégée arithmétiquement des dires d'experts (pondérés subjectivement) sans aucun traitement spécial des biais qui pourraient entacher les dires d'experts.

3.3 Traitement et élicitation des dires experts mis en œuvre pour l'évaluation de la performance des digues fluviales

Vuillet (2012) dans ces travaux concernant l'évaluation du niveau de sûreté des digues fluviales, propose plusieurs modalités d'élicitation des dires d'experts afin de réduire les différents biais susceptibles d'altérer les évaluations expertes de la sûreté des digues :

- Les biais de disponibilité et de représentation :
  Lors du renseignement des critères par l'ingénieur, le modèle met à sa disposition toutes les informations à considérer pour l'évaluation de la performance des ouvrages. Ainsi, l'ingénieur est amené à considérer l'ensemble des critères d'évaluation des digues et, par-là, à réduire les biais liés aux éléments qu'il a le plus en mémoire (biais de disponibilité) ou liés à une mauvaise appréciation de la représentativité des éléments (biais de représentation).
- Le biais de sur-confiance :
  Lors de l'élicitation, l'ingénieur spécialisé doit indiquer quelles conditions auraient pu amener les quantiles 5% et 95% à être estimés plus bas/haut et pourquoi ils ne le sont pas. Il doit ainsi être amené à donner une attention particulière à la justification de l'incertitude qu'il associe à chaque critère évalué.
- Le biais d'ancrage :
  Il propose d'éliciter les valeurs extrêmes de la distribution avant la valeur centrale. Cette démarche doit amener l'ingénieur à considérer l'ensemble des aspects de l'évaluation du critère avant d'éliciter la valeur qu'il considère la plus vraisemblable.

En synthèse, ces modalités d'élicitation pourraient contribuer à la réduction des biais cognitifs entachant les évaluations probabilistes expertes lors de la phase d'élicitation. Toutefois les points faibles de ces modalités restent les suivants : 1) aucune démarche permettant l'exploitation et l'agrégation des avis experts n'a été proposée, 2) elles ne permettent pas d'identifier et de réduire explicitement les biais cognitifs, notamment le biais de sur-confiance.

3.4 Synthèse

Nous avons vu précédemment que le jugement expert utilisé dans l'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales est nécessaire, au vu du manque de données et de la complexité de mécanismes de rupture mal connus. Nous avons identifié plusieurs démarches proposées dans le domaine de la statistique et de l'économie apportant des réponses à des problèmes fondamentaux soulevés par l'utilisation du jugement expert : élicitation, calibration, agrégation, dé-biaisage. Ces éléments sont encore très peu abordés dans le domaine des ouvrages hydrauliques voir pas du tout en dehors de l'élicitation. Dans le chapitre qui suit nous présentons la proposition de notre travail de recherche visant à construire une démarche la plus complète possible de traitement des biais heuristiques dans le

cadre de l'utilisation du jugement expert pour l'évaluation de la fiabilité structurelle des digues.

4 Proposition de thèse

Nous avons présenté les différents types de digues, leurs grands mécanismes de rupture, les différentes méthodes d'évaluation du niveau de sûreté de ces ouvrages ainsi que le contexte général de données lacunaires et de manque de connaissance sur les mécanismes menant à des ruptures. Ces ouvrages sont souvent anciens, mal connus, mal entretenus et parfois sous dimensionnés. En réponse à cette situation, la réglementation française relative à l'évaluation du niveau de sécurité des digues a été renforcée. Désormais, les digues fluviales doivent faire l'objet de diagnostics systématiques et de visites techniques périodiques afin d'évaluer leur fiabilité. Les digues présentant les plus forts enjeux nécessitent la réalisation d'études de dangers et de revues de sûreté dans un cadre probabiliste.

Même si la situation s'est améliorée ces dernières années et continue à s'améliorer, ces ouvrages sont caractérisés par une faible quantité de données disponibles, par des mécanismes de défaillance complexes et par un comportement difficilement modélisable, vu l'absence de critères, pour certains états-limites, permettant de calculer mathématiquement un niveau de sûreté de ces ouvrages. Les pratiques actuelles de l'évaluation des digues reposent largement sur le jugement expert et la démarche d'évaluation est largement qualitative et déterministe.

Des recherches ont été menées dans le but de construire un modèle d'aide à la gestion patrimoniale des digues (Serre, 2005). Elles ont permis une modélisation des mécanismes de rupture des digues, l'identification d'indicateurs d'évaluation des digues et leur agrégation en critères d'évaluation. D'autres recherches plus avancées ont été menées dans le but de construire un modèle probabiliste d'évaluation de la performance des digues (Vuillet, 2012) avec comme ambition d'apporter une aide aux ingénieurs pour le diagnostic des digues pour les principaux mécanismes de rupture connus. Le point commun entre ces recherches est l'intervention du jugement expert pour une analyse qualitative du niveau de sûreté, des méthodes ne permettant pas de réaliser une évaluation probabiliste de la fiabilité à partir du jugement expert.

Dans ce contexte et à la lumière des éléments bibliographiques présentés, nous proposons dans notre thèse une réponse à cette problématique par le développement d'une démarche mathématisée permettant l'évaluation probabiliste de la fiabilité des digues à partir du jugement d'expert. Nous détaillons tout d'abord les éléments principaux de la thèse : la problématique, l'objectif, les questions scientifiques, les méthodologies scientifiques disponibles et, *in fine*, nous présentons une proposition de démarche de thèse.

4.1 Problématique de la thèse

Du point de vue de l'ingénierie, quatre mécanismes de rupture des digues sont à considérer : surverse, érosion interne, affouillement et glissement. Seul ce dernier bénéficie d'une définition et d'une caractérisation de l'état-limite suffisamment précises pour permettre le calcul d'une probabilité de défaillance par des approches quantitatives.

Les trois autres mécanismes présentent des difficultés significatives pour l'évaluation d'une probabilité de défaillance. Une difficulté provient de la forte présence d'incertitudes résultants principalement de la combinaison d'incertitudes épistémiques sur le déclanchement et l'accélération des mécanismes de rupture, tel que l'érosion interne par exemple, nous manquons ainsi de critères d'états-limites nécessaires pour modéliser le comportement réel de la défaillance des digues avec d'autres incertitudes, épistémiques elles-aussi, sur les données : manques de données statistiques. Aussi, on note la présence d'incertitudes aléatoires tout au long du linéaire de la digue du fait de la variabilité naturelle des matériaux constitutifs d'un linéaire d'ouvrage, y compris à l'échelle d'un tronçon homogène.

Actuellement dans l'ingénierie, l'évaluation de la fiabilité des digues se fait par expertise. Les experts constitués en panel se basant sur les données existantes, élicitent une probabilité de défaillance pour plusieurs profils constituant un tronçon d'une digue ; la probabilité de défaillance finale correspond à la probabilité la plus élevée élicitée par le panel d'experts. Cette démarche basée sur le jugement expert permet d'apporter une réponse aux incertitudes décrites ci-dessus.

Cependant, le jugement expert en matière d'évaluation de la fiabilité des digues comporte des heuristiques qui génèrent des biais susceptibles d'altérer les aptitudes d'un expert à éliciter sa réelle opinion. La présence des biais alterne les évaluations expertes, les rendant moins fiables. Dès lors, une procédure rigoureuse de recueil, d'exploitation et de traitement de jugement expert demeure une nécessité de première importance pour les ingénieurs en charge de l'évaluation subjective du niveau de sécurité des digues.

4.2 Objectif de la thèse

L'objectif de la thèse est l'élaboration d'une démarche complète d'aide à l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert en contexte de données incertaines et de mécanismes de défaillance complexes.

Nous proposons d'élaborer une démarche permettant d'évaluer mathématiquement par le jugement expert une probabilité de défaillance des digues, y compris pour les cas d'évaluation de probabilité rare (inférieure à 10^{-3}). Ce modèle a se donne pour objectifs de réduire autant que possible les biais susceptibles d'entacher le jugement expert.

4.3 Questions scientifiques

La question scientifique principale est la suivante : comment évaluer le niveau de la sécurité des digues de façon experte dans des situations de probabilités de défaillance fortes à très faibles ? Comment identifier et réduire les biais experts lors de l'évaluation probabiliste de la sûreté des digues ?

Elle sous-entend les questions scientifiques suivantes :

A. comment éliciter et recueillir des évaluations expertes probabilistes dans un contexte incertain ?

B. Comment prendre en compte simultanément les avis probabilistes de plusieurs experts ?
C. Comment exploiter les évaluations expertes pour identifier et réduire les biais suite à la phase d'élicitation ?

4.4 Méthodologies scientifiques disponibles

La littérature statistique et économique offre plusieurs méthodologies pour le recueil et l'exploitation du jugement expert dans un contexte d'évaluation marqué par des incertitudes. Ces différentes méthodologies pourraient être catégorisées selon trois principes :

- le principe d'élicitation des avis experts : il offre des modalités et des protocoles d'élicitation, plutôt psychologiques, pour 1) éviter les biais qui pourraient entacher, lors de la phase d'élicitation, les avis experts et 2) améliorer la phase même du recueillement du jugement expert. En outre, ce principe offre des règles pour exploiter le jugement expert d'une façon individuelle ou collective ;
- le principe de calibration : il offre des modèles mathématiques permettant de pondérer, d'agréger et de calibrer les avis experts ;
- le principe de dé-biaisage mathématique : il offre des modèles mathématiques permettant de traiter les biais cognitifs entachant les avis experts, notamment le biais de sur-confiance.

Ces trois principes ont été développés et ont été mis en œuvre par plusieurs modèles d'application dans des différentes disciplines comme l'économie, la statistique, l'actuariat, la psychologique et l'ingénierie. Ces principes partagent entre eux l'objectif commun de trouver le meilleur traitement des biais entachant le jugement expert.

Jusqu'à présent, ces principes n'ont pas été regroupés et combinés par une démarche intégrale. Leur potentiel de synergie n'a donc pas été exploité et il n'a jamais été mis en œuvre à notre connaissance dans le domaine de génie civil. Dès lors, notre ambition est d'utiliser ces principes pour développer une démarche complète et adaptable au contexte d'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert.

4.5 Démarches de la thèse

Le couplage entre la littérature statistique / économique et la littérature de génie civil semble pertinent. Il permet de renforcer le domaine d'évaluation de la fiabilité des digues fluviales par des méthodes plus ciblées et plus efficaces permettant une meilleure exploitation du jugement expert. Dans ce contexte nos besoins dans le domaine de génie civil pour une meilleure exploitation du jugement expert sont les suivants :

1- Besoin 1 : des démarches pour le recueillement et l'élicitation des avis experts incertains.

2- Besoin 2 : des démarches de pondération, de calibration et d'agrégation des avis experts incertains.
3- Besoin 3 : des démarches mathématisées de dé-biaisage des avis experts incertains.

Ces besoins correspondent aux trois questions scientifiques énoncées précédemment sont illustrés par le schéma ci-dessous.

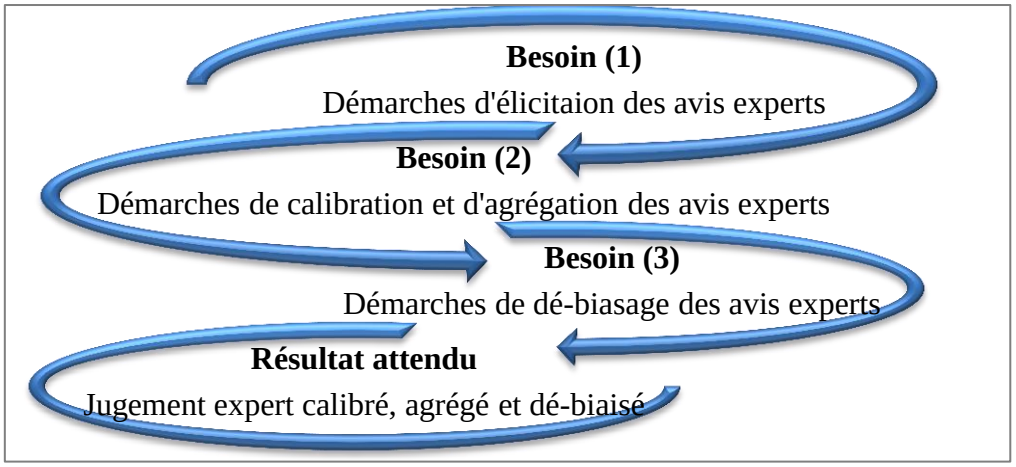


Figure 4-1. Les différents besoins du domaine du génie civil pour une meilleure exploitation du jugement expert

En se basant sur les trois différents besoins du domaine du génie civil, nous proposons ci-dessous une démarche générale de la thèse visant à combler les lacunes entachant l'exploitation du jugement expert pour l'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales.

1	**Elicitation des avis experts**
↓	- Définir un protocole pertinent pour l'évaluation probabiliste de la fiabilité des digues à dire d'expert - Construire un formulaire de questionnement - Constitution d'un panel d'expert
2	**Calibration des avis experts**
↓	- Choisir et développer un modèle de calibration des avis experts adapté aux données et au contexte des digues - Choisir un protocole d'agrégation des avis experts
3	**Dé-biaisage des avis experts**
↓	Justifier et élaborer une méthode adaptée aux formats d'élicitation choisi et au contexte des digues pour dé-biaiser les avis experts
4	**Application**
	Tester et valider le modèle développé sur une étude de cas

Figure 4-2. Démarche générale de la thèse

Partie II

Méthodologies pour l'identification et la réduction des biais heuristiques susceptibles d'altérer les évaluations expertes du niveau de sûreté des digues fluviales

Contenu de la Partie II

Chapitre 5
- Principes des méthodes de traitement du jugement d'expert
- Etat de l'art sur les méthodes d'élicitation du jugement d'expert
- Etat de l'art sur les méthodes de calibration et d'agrégation du jugement d'expert
- Etat de l'art sur les méthodes de dé-biaisage mathématisées du jugement d'expert

Chapitre 6
- Principes des méthodes de traitement du jugement d'expert pour les digues
- Méthodologies pour les digues pour l'élicitation du jugement d'expert
- Méthodologies pour les digues pour la calibration et l'agrégation du jugement d'expert
- Méthodologies pour les digues pour le dé-biaisage mathématisé du jugement d'expert
- Combinaison d'approche « EiCAD » et «EiDA »

5 Méthodes de recueil et de traitement des évaluations à dires d'experts

Les développements des méthodes concernant le traitement et la réduction des biais susceptibles d'entacher le jugement expert ont d'abord porté sur la recherche des moyens pour améliorer le processus de la phase même de l'élicitation puis sur la calibration des dires d'experts (Fischhoff, 1982 ; Cooke, 1991). Des recherches ultérieures ont proposé des méthodes mathématiques dédiées à la réduction des biais comme Shlyakhter et al. (1994) et Clemen et Lichtendahl (2002).

O'Hagan et al. (2006) classe les approches de réduction des biais en deux catégories. La première correspond à des mesures préventives à appliquer lors de la phase d'élicitation des avis experts. Des mesures liées aux choix des experts (opter pour les différentes spécialités, les différentes expériences approfondies …) et des mesures liées à la structuration de la tâche de questionnement des experts. La seconde correspond à des mesures simples à prendre après la phase d'élicitation des avis experts dans le but d'ajuster les jugements d'expert dans une logique de réduire les biais susceptibles de l'entacher.

Dans cette recherche, nous proposons de catégoriser les démarches méthodologiques de traitement et de réduction des biais du jugement d'expert en trois catégories: 1) les démarches d'élicitation des dires d'experts, 2) les démarches de calibration et d'agrégation des dires d'experts, et, 3) les démarches de dé-biaisage des dires d'experts. **La première** se focalise, d'une part sur la présentation du problème à évaluer et d'une autre part, sur les méthodes de recueil et d'exploitation des dires d'experts. Ce type de démarche vise à élaborer un protocole de questionnement (pour l'élicitation du jugement d'expert) associé à un modèle de dysfonctionnement reflétant la défaillance du système à évaluer. **La deuxième** se focalise sur des traitements mathématiques via des processus de calibration et d'agrégation des dires d'experts. Ce type de démarche vise à caractériser les experts en tant que sources d'informations par l'évaluation de la justesse et de la précision de leurs élicitations, ce qui permet d'accorder à leurs avis un poids de calibration utilisé ensuite pour les combiner et les agréger. **La troisième** se focalise sur des traitements mathématiques spécifiques à la réduction des biais, notamment le biais de sur-confiance. Ce type de démarche vise à modifier mathématiquement les valeurs élicitées par l'expert afin de corriger quantitativement les effets de biais susceptibles d'entacher ses élicitations.

En se basant sur cette catégorisation des méthodes de traitement du jugement expert : élicitation, calibration, agrégation, et dé-biaisage des avis experts, ce cinquième chapitre se donne comme objectif d'examiner les différentes méthodes développées dans la littérature scientifique et ayant comme but de traiter les biais susceptibles d'entacher le jugement d'expert.

5.1 Principes des méthodes de traitement du jugement d'expert

Les modèles mathématiques de traitement de biais du jugement d'expert comme la calibration et le dé-biaisage des avis experts se basent sur un principe de distinction entre deux variables : variables de calibration et variables d'intérêt (Cooke, 1991 ; Shalyakhter et *al.*, 1997 ; Clemen et Lichtendahl, 2002). Les variables de calibration correspondent à des variables dont les vraies valeurs sont connues et, inversement les variables d'intérêt correspondent à des variables dont les vraies valeurs sont inconnues et recherchées. Ces dernières sont en général les variables pour lesquelles on mène l'étude et on mobilise les experts. Les auteurs (Cooke, 1991 ; Shalyakhter et *al.*, 1997 ; Clemen et Lichtendahl, 2002 ; Pigeon, 2002) définissent précisément les notions de ces variables :

- les variables d'intérêt (random variables) sont des variables dont l'analyste cherche à connaître les valeurs. Il souhaite utiliser les avis des experts pour construire une distribution probabiliste subjective ou avoir une valeur simple concernant la réalisation de ces variables. Nous pouvons qualifier ces variables comme des variables passives car leur traitement est basé sur les résultats issus des méthodes de traitement du jugement expert utilisant, pour leur mise en œuvre, les variables de calibration.
- les variables de calibration (calibration variables) sont des variables susceptibles d'éclairer l'analyste sur la capacité des experts à fournir une estimation juste et précise. Elles sont des variables d'un domaine connu et le plus proche possible de la variable d'intérêt et pour lesquelles il existe des résultats connus (expérimentaux, observés, analytiques,…) que l'analyste connait. Les vraies valeurs connues de ces variables aident à analyser mathématiquement les éventuelles tendances de l'expert à la surestimation ou à la sous-estimation dans ses évaluations. Nous pouvons qualifier ces variables comme des variables actives car elles sont l'essence qui permet la mise en œuvre de toutes les méthodes mathématiques de traitement du jugement expert.

L'organigramme ci-dessous illustre la procédure générale d'utilisation des variables de calibration et des variables d'intérêt :

1- Les variables de calibration (variables actives) sont les données d'entrées pour la mise en œuvre des méthodes de traitement du jugement d'expert ;
2- Les méthodes de traitement du jugement d'expert (méthode de calibration et méthodes de dé-biaisage) permettent d'analyser le jugement d'expert donné sur les variables de calibration ;
3- L'analyse du jugement expert aboutit à des poids de calibration ainsi qu'à des facteurs de correction pour chaque élicitation experte ;
4- Les poids de calibration et les coefficients de correction permettent le traitement de biais afin de corriger les élicitations des variables d'intérêt (variables passives) ;
5- Le résultat final attendu correspond aux variables d'intérêt corrigées, en d'autres termes, aux variables d'intérêt calibrées, pondérées et dé-biaisées.

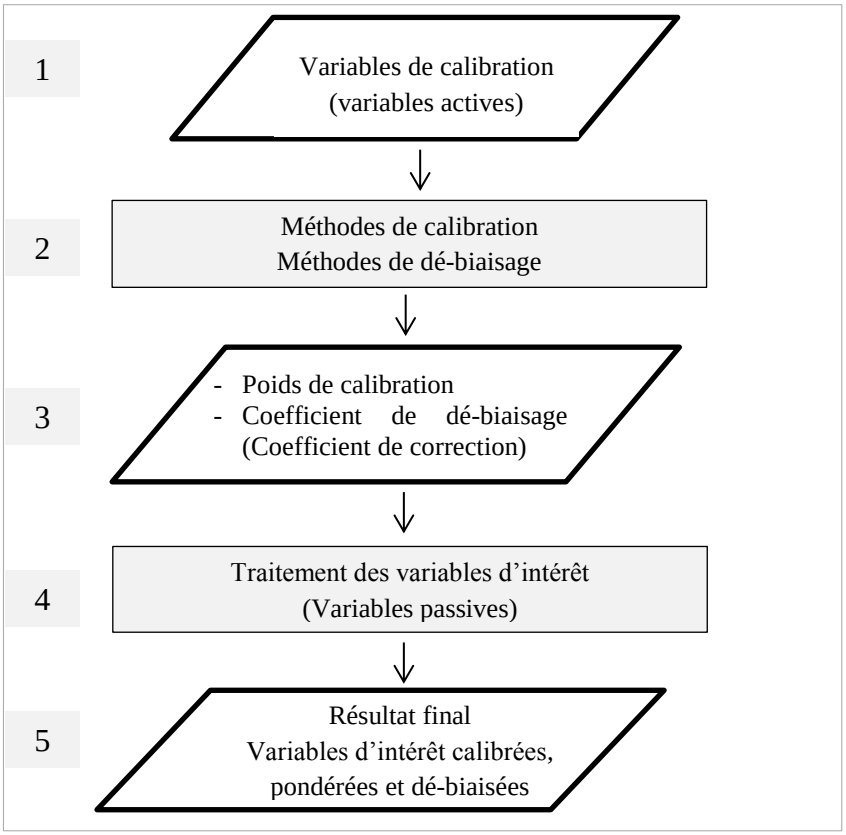


Figure 5-1. Organigramme de la procédure générale d'utilisation des variables de calibration et des variables d'intérêt

Les qualifications des variables de calibration n'ont pas été données formellement dans la littérature statistique. Les chercheurs qualifient ces variables comme « variables ***almanac »*** (Cooke, 1991 ; Clemen et Lichtendahl, 2002) ce qui signifie des variables (des questions) simples à poser aux experts et simples à évaluer, dont les vraies valeurs doivent être connues et fiables. Dans ce sens, nous pouvons dire que les variables de calibration doivent être, d'une part ***crédibles*** ce qui signifie que les experts pourraient d'une manière concrète déterminer leurs vraies valeurs, et d'une autre part ***intuitives*** ce qui signifie que les experts devraient être capables de donner leurs jugements et d'assigner une valeur à ces variables aisément et rapidement. Le Tableau 5-1 détaille les différentes caractéristiques des variables de calibration et celles d'intérêt. Puis dans la suite de ce chapitre un panorama des méthodes d'élicitation, de calibration et de dé-biaisage des avis experts (basées sur les principes des variables de calibration et d'intérêt) sera présenté.

Tableau 5-1. Caractéristiques des variables de calibration et des variables d'intérêt

	Variables de calibration	Variables d'intérêt
Notation	VC	VI
Rôle	Variables actives	Variables passives
Vraies valeurs	connues	inconnues
Nature	Du même domaine ou proche des variables d'intérêt	Propre au contexte de l'étude

<table>
<tr><th></th><th>Variables de calibration</th><th>Variables d'intérêt</th></tr>
<tr><td>Forme</td><td colspan="2">Une seule valeur (déterministe ou probabiliste)
ou
Une valeur sous format probabiliste (intervalle de confiance)</td></tr>
<tr><td>Type</td><td colspan="2">Variables probabilistes ou déterministes
Ex : probabilité d'occurrence d'un phénomène - prix de maintenance d'un système - prix d'un service - prime d'un accident – un nombre – une date – un taux / pourcentage de consommation - un taux / pourcentage de réalisation, etc.</td></tr>
<tr><td>Modalité d'obtention</td><td>Analyse quantitative – analyse statistique - retour d'expérience – valeurs observées - valeurs expérimentales</td><td>Jugement expert</td></tr>
</table>

5.2 Méthodes d'élicitation du jugement d'expert

Eliciter « *c'est aider l'expert à formaliser ses connaissances pour permettre de les sauvegarder et de les partager* (Cooke, 1991) ». L'**élicitation** « *est un processus de recueil des jugements d'experts à travers des méthodes de communication verbale ou écrite spécialisées permettant de quantifier un risque* (Meyer et Booker, 1993) ».

5.2.1 Introduction au concept d'élicitation du jugement d'expert

O'Hagan et *al.* (2006) distingue les méthodes d'élicitation des dires d'experts directes et indirectes :

- Les méthodes d'élicitation directe correspondent à une élicitation directe des réponses qui implique simplement de demander à l'expert de donner et de préciser sa réponse sur une question donnée.
- Les méthodes d'élicitation indirecte correspondent : 1) aux paris qui peuvent être utilisés pour déduire les probabilités subjectives d'un expert (par exemple, on demande à un expert du domaine économique s'il accepte de parier sur l'événement *A* sachant que le taux de gain correspond à XXX euros) et, 2) aux roues de probabilités qui sont également couramment utilisées dans la méthodologie de paris. Les probabilités sont présentées autour de la circonférence d'un disque, divisé en deux segments : l'un représente la probabilité de l'événement et l'autre son complément. Dans ce cas-là, l'expert manipule la roue pour déterminer une probabilité (de gain par exemple) si l'événement en question se produit.

O'Hagan et *al.* (2006) mentionnent aussi que les experts peuvent apprendre à donner des avis bien précis et calibrés via des formations d'apprentissage spéciales. Dans le même ordre d'idée, Fischohoff (1982) spécifie plusieurs conditions qui pourraient aider à améliorer le jugement expert :

1. réaliser des pratiques abondantes d'élicitation de jugements d'expert sur un ensemble homogène de tâches ;
2. bien définir les éléments de l'événement que l'on demande aux experts d'évaluer ;
3. accorder une importance spéciale à la tâche d'élicitation pour qu'elle se déroule dans des conditions parfaites.

Il existe un large consensus scientifique sur les principales étapes des élicitations des valeurs à dires d'experts partagé par plusieurs chercheurs du domaine comme Spetzler et Staelvonholstein (1975) ; Morgan et Henrion (1990) ; Cooke (1991) ; (2004). Dans ce contexte Clemen et Reilly (2001) soulignent trois étapes principales pour une démarche d'élicitation des avis experts : 1) définir le problème, 2) identifier et recruter les experts et, 3) éliciter les dires d'experts.

Définir le problème

Cette étape consiste à : 1) identifier les variables cibles, 2) choisir le format de la procédure d'élicitation (par une interview ou par un formulaire) et, 3) préparer des

documentations liées au contexte d'étude (le cadre général de l'étude, les objectifs, les attentes, la façon dont les résultats seront utilisés).

- **Identifier et recruter les experts**

Cette étape consiste à : 1) identifier les experts du panel ayant des compétences nécessaires pour évaluer et traiter le problème d'évaluation, 2) déterminer des critères permettant d'identifier le panel d'experts et, 3) prendre des engagements auprès des experts identifiés.

- **Eliciter les dires d'experts**

Cette étape consiste à mettre en œuvre la phase d'élicitation des dires d'experts, après avoir identifié le panel d'experts et identifié toutes les références nécessaires liées au problème d'évaluation afin de réduire toute ambiguïté qui mène à des incertitudes. Le principe est que le problème soit bien exposé pour faciliter l'élicitation et minimiser le nombre de questions posées au panel d'experts.

Dans le même ordre d'idée Garthwaite et *al.* (2005) présentent, par quatre étapes, un processus d'élicitation des avis experts placé dans un contexte probabiliste :

1- l'étape de préparation de l'élicitation, comprenant l'identification des variables à éliciter, le choix et l'entraînement des experts ;
2- l'étape d'élicitation des éléments spécifiques des variables. Chaque expert élicite les paramètres nécessaires pour formaliser son opinion sous la forme d'une fonction de densité de probabilités. Il s'agit du cœur du processus ;
3- la construction d'une distribution de probabilités à partir des éléments fournis par l'expert. En pratique cette étape est souvent mêlée à la précédente, en ce sens que le choix des éléments à éliciter est souvent influencé par la forme de la distribution que l'on souhaite construire ;
4- l'élicitation est un processus itératif. La quatrième étape implique de vérifier que la distribution correspond bien à l'opinion de l'expert. On peut prendre l'option de revenir à l'étape 2 et de demander plus d'éléments à l'expert.

De façon générale, le choix d'une procédure d'élicitation dépend de plusieurs critères : 1) le type d'information recherchée, 2) les contraintes de temps liées à l'étude et, 3) les résultats attendus. Dans ce contexte, Von Winterfeldt et Edwards (1986) ; Spetzler et Staalvonholstein (1975) et Ferrell, (1994) préconisent un protocole d'élicitation en 5 étapes comprenant: motiver les experts, structurer le questionnaire d'élicitation, organiser la séance d'élicitation, coder la modalité d'élicitation et vérifier le résultat d'élicitation.

1- Motiver les experts

Cette étape consiste à motiver les experts à donner leurs propres avis sur le problème d'évaluation. L'analyste devrait expliquer aux experts que les élicitations souhaitées à évaluer devraient refléter leurs propres croyances accordées aux valeurs car il n'y a pas de bonne réponse attendue (Boyd et Regulinski, 1979).

2- Structurer le questionnaire d'élicitation

Cette étape consiste à préparer les documentations nécessaires à l'élicitation des avis experts. L'analyste devrait préparer une définition univoque de chaque quantité, paramètre ou facteur incertain demandé à être évalué par l'expert (Spetzler et Staelvonholstein, 1975 ; Tetlock, 2005). Il est important de présenter, aux experts, les questions dans un format simple convenant le mieux à leurs connaissances et leurs expériences, afin d'éviter une charge cognitive supplémentaire.

3- Organiser la séance d'élicitation

Cette étape consiste à fournir aux experts les informations nécessaires pour pouvoir éliciter leurs jugements et en discuter. Cela permet aux experts d'avoir des informations sur lesquelles ils fonderont leurs évaluations et leurs jugements. Ce processus peut mettre en évidence des biais cognitifs, et encourager les experts à trouver d'autres manières d'évaluer le problème. Par exemple lors de la discussion, les experts peuvent être invités à examiner divers scénarios qui peuvent conduire à des résultats inattendus. Ces manipulations ont montré leur efficacité pour aider à réduire le biais de sur-confiance qui pourrait entacher les avis experts.

4- Coder la modalité d'élicitation

Cette étape consiste à trouver une meilleure façon de questionner les experts dans le but d'éviter les biais liés au jugement expert. Par exemple, l'analyste pourrait demander aux experts d'éliciter des valeurs extrêmes, et, ensuite de décrire les scénarios qui pourraient mener à des valeurs en dehors de ces valeurs extrêmes élicitées.

5- Vérifier le résultat d'élicitation

Cette étape consiste à évaluer, par l'analyste, si les jugements des experts reflètent fidèlement leurs croyances. A titre d'exemple, l'analyste détermine le résultat final puis, il en discute avec l'expert.

En synthèse, l'utilisation du jugement expert, notamment sous format probabiliste, nécessite des démarches scientifiques spécifiques pour éliciter des avis experts. Dès lors, il est pertinent d'examiner les différentes méthodes développées dans le domaine de l'ingénierie, de la statistique et de la psychologique ayant comme but de trouver les protocoles et les modalités les plus adaptées pour éliciter les avis experts. Dans la suite, nous proposons d'examiner les démarches d'élicitation à partir de stratégiques d'ordre psychologique, par technique de décomposition ou de modalité d'élicitation.

5.2.2 Stratégies psychologiques d'élicitation des dires d'experts (Koehler et Harvey, 2004)

Koehler et Harvey (2004) proposent plusieurs stratégies psychologiques pour l'élicitation des avis experts dans l'objectif de diminuer la présence des biais susceptibles de les entacher : 1) stratégies motivationnelles, 2) stratégies cognitives, et 3) stratégies technologiques.

1- Les stratégies motivationnelles correspondent à des techniques psychologiques ayant comme but d'amener les experts à mobiliser au mieux leur savoir pour réaliser une bonne élicitation à dires d'experts. Elles portent sur l'incitation et la responsabilité.

Les Incitations peuvent améliorer la prise de décision, car dans le cas contraire, les experts ne s'intéressent pas suffisamment pour formuler une bonne décision. En d'autres termes, les experts vont dépenser plus d'efforts sur « la réflexion» si les enjeux sont suffisamment élevés. En effet, le manque de motivation peut être un problème lors d'une prise de décision où les tâches sont vraiment difficiles. L'expert peut se contenter d'une recherche superficielle pour trouver une solution, puis fournir un avis. Dans ce cadre, les incitations peuvent être un outil efficace pour améliorer la prise de décision et aligner l'effort individuel avec les intérêts de l'organisation (Camerer et Hogarth, 1999).

La Responsabilité peut améliorer la prise de décision, car la logique de la responsabilité est similaire à la logique des incitations, sauf que cela dépend des effets et des avantages sociaux (tels que faire une impression favorable et d'éviter l'embarras). En effet, les experts, en se préparant pour justifier et présenter leurs avis aux autres, anticipent les défauts dans leurs propres arguments tout en améliorant ainsi leurs processus de décision et leurs résultats.

2- Les stratégies cognitives correspondent à des techniques psychologiques permettant d'améliorer la phase des élicitations expertes. Elles s'agissent de la technique d'envisager le contraire et la technique de former les experts à une tâche d'élicitation.

La technique d'envisager le contraire consiste à demander à l'expert de réfléchir autrement en répondant à la question suivante : «*Quelles sont les raisons selon lesquelles son jugement initial pourrait être mauvais?* »

La technique de former et préparer les experts à une tâche d'élicitation consiste à développer les compétences d'expert à éliciter son avis par des formations en statistique, pour les experts ayant une connaissance limitée dans ce domaine. Ce qui leur permet d'acquérir des compétences nécessaires pour résoudre des problèmes liés à leur contexte de travail (Fong et *al.*, 1986). En effet, les recherches montrent que, sans l'accompagnement des compétences en outils d'aide à la décision, il est peu probable que l'expérience soit suffisante à l'expert pour éliciter un avis non-biaisé.

3- Les stratégies technologiques correspondent à la création d'un panel d'experts (groupe de décision) et à d'autres stratégies, plus complexes, ayant comme objectif d'être utilisées dans une démarche d'aide à la décision multicritères (analyse d'utilité multi-attributs, analyse de décision, et système d'aide à la décision). Ces dernières stratégies ne seront

pas présentées dans cette recherche car nous nous intéressons uniquement à la stratégie du panel d'experts, le lecteur intéressé par ces stratégies pourra consulter le livre de Koehler et Harvey (2004).

Le groupe de décision est un moyen efficace pour la réduction des biais lors de la prise de décision dans un contexte incertain. En effet, l'utilisation de groupes de décision dans l'objectif d'améliorer les décisions dépend de la convivialité du groupe, des expériences diverses de chaque membre du groupe et de leurs formations. Au final, l'exigence fondamentale de la prise de décision collective est que les experts doivent formuler leurs propres hypothèses, jugements et estimations indépendamment les uns des autres avant de travailler dans le groupe, puis se mettre d'accord sur un jugement consensuel. Dans le processus de groupe de décision, les idées partagées pourraient susciter de nouvelles idées et de nouvelles solutions.

Intérêts et limites

Les stratégies psychologiques d'élicitation des avis experts proposées par Koehler et Harvey (2004), ayant comme but d'améliorer la phase d'élicitation des avis experts afin de minimiser la présence des biais susceptibles de les entacher, restent des démarches préparatoires pour le recueil des dires experts. Elles ne permettent pas de réduire explicitement, les biais susceptible d'entacher les avis experts, notamment le biais de sur-confiance / sous-confiance. Toutefois, le groupe de décision (panel d'experts) mène à une piste pertinente pour le recueil des dires d'experts puisqu'il est compatible et même complémentaire avec les modèles de calibration, d'agrégation et de dé-biaisage mathématiques des avis experts qui exigent, pour leurs applications, d'avoir plusieurs experts et de nombreuses élicitations expertes.

5.2.3 Techniques de décomposition pour l'élicitation des dires d'experts (Vick 2002)

Vick (2002) propose de modéliser l'événement cible, pour lequel les experts devraient attribuer et éliciter une probabilité de défaillance subjective, via une méthode de modélisation par *décomposition*. Cette méthode de modélisation aide à réduire les biais cognitifs des experts et particulièrement le biais de sur-confiance. En général, la décomposition « *est essentiellement une conception mentale interne qui montre comment une séquence d'évènements peut se dérouler* (Vick, 2002) ». En termes pratiques la décomposition consiste à diviser un grand problème en plusieurs petites parties (plusieurs composants / plusieurs petits problèmes) qui d'une façon ordinaire sont plus facilement traçables. Ce qui contribue à diviser l'incertitude sur plusieurs composants et puis pouvoir attribuer précisément une probabilité subjective à chacun de ces composants (Vick, 2002). La décomposition selon Raiffa (1968) consiste à diviser un problème complexe en plusieurs problèmes plus simples, puis analyser chacun de ces problèmes, puis rassembler les analyses ensemble logiquement, pour à la fin, mettre au point un protocole d'action pour traiter le problème complexe initial.

Dans ce contexte, certaines études expérimentales ont examiné les effets de la décomposition sur l'estimation de la probabilité subjective, comme celles d'Henrion et *al.* (1993) ; MacGregor et al. (1988) ; MacGregor et Armstrong (1994) ; Edmunson (1990) ; Wright et *al.* (1994) ; Kleinmuntz et *al.* (1996) et Hora et *al.* (1993). Elles ont montré une certaine réduction de biais de sur-confiance par la décomposition. Mais cette réduction varie d'une étude à l'autre. Une des raisons de ces différences est liée au niveau de décomposition. Par exemple, un niveau de décomposition divisant l'évènement cible en deux ou trois composants voire plus donne un résultat meilleur qu'un événement n'est pas décomposé. Ceci est particulièrement important quand la décomposition est utilisée pour obtenir des valeurs extrêmes de la probabilité cible, notamment dans les applications en ingénierie concernant l'évaluation des probabilités faibles de défaillance.

Intérêts et limites

Dans le domaine des digues fluviales, les travaux de Serre (20015) et Vuillet (2012) réalisés par l'application des notions de la sûreté de fonctionnement (SDF) afin de modéliser les différents mécanismes de rupture des digues revient à cette pratique de décomposition. La décomposition de chaque mécanisme de rupture en plusieurs séquences élémentaires permet d'avoir un modèle détaillé de dysfonctionnement de l'ouvrage. Cela facilite pour les experts l'évaluation des probabilités de défaillance.

Toutefois, la décomposition reste une démarche de présentation du problème à évaluer par le jugement d'expert. Elle ne permet pas de réduire, explicitement, les biais, notamment les biais de sur-confiance / sous-confiance susceptibles d'entacher les avis experts. Il apparait opportun d'accompagner cette démarche de décomposition par d'autres démarches de réduction des biais post-élicitation.

5.2.4 Techniques d'élicitation des dires d'experts (Soll et Klayman, 2003)

Soll et Klayman (2003) ont réalisé une étude portant sur la réduction des biais de sur-confiance par l'application de trois techniques différentes d'élicitation des dires d'experts. Cette étude suit l'approche utilisée par Soll (1996) basée sur l'utilisation des «*informations de repérage objectif* ». Celle-ci prévoit de présenter aux experts des indices et des données à partir desquels une estimation probabiliste pourra être faite. En d'autres termes, les informations de repérage objectif sont des données fiables décrivant le contexte étudié (ouvrage, structure, composant) et qui se présentent sous forme d'une distribution statistique théorique ou expérimentale ou simplement sous forme d'une valeur déterministe. Ces informations ont comme but de décrire le contexte d'évaluation et de donner aux experts tous les éléments pouvant leur aider à réaliser l'évaluation demandée. Les trois techniques d'élicitation des avis experts sont les suivantes :

1) **1ère technique d'élicitation : élicitation des avis experts sous forme d'intervalle d'incertitude**

Les experts doivent donner leurs estimations sous forme d'un seul intervalle d'incertitude en précisant les deux bornes inférieures et supérieures (par exemple intervalle d'incertitude se composant respectivement du quantile 5% et 95%). Dès lors, au titre d'exemple d'application, un expert doit compléter les deux phrases suivantes dans l'objectif d'estimer le coût d'une voiture :

- Je suis certain à 95% que le prix de la voiture est au moins [XX] ;
- Je suis certain à 95% que le prix de la voiture ne dépasse pas [YY].

2) 2ème technique d'élicitation : élicitation non ordonnée des avis experts sous forme d'intervalle d'incertitude et une valeur plus vraisemblable

Les experts doivent donner leurs estimations sous forme d'un seul intervalle d'incertitude en précisant les deux bornes inférieures et supérieures et en précisant la valeur la plus vraisemblable (par exemple intervalle d'incertitude se composant respectivement du quantile 5% et 95% et une valeur plus vraisemblable correspondant au quantile 50%). Dès lors, au titre d'exemple d'application, un expert doit compléter les trois phrases suivantes dans l'objectif d'estimer l'année d'un évènement passé :

- Je suis certain à 95% que l'année dans laquelle l'évènement s'est passé est après [XXXX] ;
- Je pense que l'année la plus vraisemblable dans laquelle l'évènement s'est passé est [MMMM] ;
- Je suis certain à 95% que l'année dans laquelle l'évènement s'est passé est avant [YYYY].

3) 3ème technique d'élicitation : élicitation ordonnée des avis experts sous forme d'intervalle d'incertitude et une valeur plus vraisemblable

Les experts doivent donner leurs estimations sous forme d'un seul intervalle d'incertitude en précisant tout d'abord les deux bornes inférieures et supérieures puis en précisant la valeur la plus vraisemblable (par exemple intervalle d'incertitude se composant respectivement du quantile 5% et 95% et une valeur plus vraisemblable correspondant au quantile 50%). Dès lors, au titre d'exemple d'application, un expert doit compléter, respectivement, les trois phrases suivantes dans l'objectif d'estimer l'année d'un évènement passé :

- Je suis certain à 95% que l'année dans laquelle l'évènement s'est passé est après [XXXX] ;
- Je suis certain à 95% que l'année dans laquelle l'évènement s'est passé est avant [YYYY].
- Je pense que l'année la plus vraisemblable dans laquelle l'évènement s'est passé est [MMMM] ;

Les résultats de cette étude menée par Soll et Klayman (2003) montrent que l'utilisation du format d'élicitation en trois points (intervalle d'incertitude et une valeur plus vraisemblable) est meilleure de celle en deux points (intervalle d'incertitude). En effet, le format de trois points présentés par deux intervalles d'incertitude provoque des biais répartis sur ces deux

intervalles d'incertitude au lieu d'être concentrées dans un seul. D'autant plus, la logique ascendante (borne inférieure, puis valeur plus vraisemblable, puis borne supérieure) produit plus de biais en donnant un intervalle d'incertitude plus large. Dans ce cas-là, l'expert à tendance à assigner une valeur basse à la borne inférieure, et augment au fur et à mesure, l'évaluation de la valeur la plus vraisemblable, et de la même manière l'évaluation de la borne supérieure. L'utilisation donc du format d'élicitation ordonné, tout d'abord la borne inférieure (valeur minimale), puis la borne supérieure (valeur maximale), puis la valeur la plus vraisemblable (troisième technique d'élicitation) permet d'avoir des intervalles d'incertitude plus précis.

Intérêts et limites

La technique d'élicitation des avis experts proposée par Soll et Klayman (2003), aide à réduire implicitement le biais experts par la précision d'un intervalle d'incertitude et d'une valeur plus vraisemblable. Toutefois, cette technique d'élicitation reste une manière pour recueillir les élicitations expertes. Elle ne permet pas de réduire, explicitement, les biais, notamment les biais de sur-confiance / sous-confiance susceptibles d'entacher les avis experts. Aussi, il apparait opportun d'accompagner cette technique d'élicitation des avis experts par d'autres démarches de réduction des biais post-élicitation

5.2.5 Synthèse

L'analyse bibliographique présentée montre que la phase d'élicitation des avis experts aide indirectement à réduire les biais experts susceptibles d'entacher le jugement expert. Cette phase permet de réduire les biais experts, d'une part, par la mise en place d'un modèle de dysfonctionnement décrivant mieux les circonstances de la défaillance de l'ouvrage, et d'autre part par la détermination d'une technique d'élicitation des avis experts permettant d'avoir des estimations probabilistes précises.

Il existe plusieurs méthodes permettant de réduire les biais experts lors de la phase d'élicitation comme : 1) les stratégies psychologiques pour réduire les biais experts comme l'identification d'un panel d'experts et autres de mise en conditions psychologiques pour éliciter les avis experts (Koehler et Harvey, 2004), 2) la méthode de décomposition proposée par Vick (2002) qui répond aux méthodes issues de la sûreté de fonctionnement, 3) des techniques spéciales d'élicitation des avis experts pour aider les experts à éliciter leurs avis comme les techniques proposées par Soll et Klayman (2003),

Ces différentes techniques présentent un intérêt pour notre recherche de méthodologies du traitement du jugement expert pour l'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales. Elles permettent d'identifier une procédure fonctionnelle pour l'élicitation et le recueil des avis experts. En outre, elles ne causent aucune contrainte limitant leur utilisation et leur association à d'autres méthodes mathématiques de calibration ou de réduction des biais post-élicitation que nous envisageons d'utiliser pour éliciter des probabilités rares (inférieure à 10^{-3}) de défaillance des digues.

In fine, quelles que soit les approches utilisées pour le recueil et l'élicitation des avis experts, elles restent des approches simples et n'apportent qu'un traitement simple des biais experts

entachant les avis experts. Alors, le fait de se contenter d'un seul traitement simple des avis experts lors de la phase d'élicitation est loin d'être une procédure optimale d'exploitation du jugement d'expert. Dès lors, un traitement plus avancé des avis experts se présente comme une nécessité pour notre recherche. Pour cela, nous présentons dans le sous-chapitre suivant les différentes méthodes post-élicitation de calibration et d'agrégation des avis experts permettant un traitement mathématique préliminaire des biais experts.

5.3 Méthodes de calibration et d'agrégation des évaluations à dires d'experts

La calibration *« est une étape permettant d'évaluer la cohérence entre l'information fournie par l'expert et des valeurs connues (expérimentales / observées)* (Cooke, 1991) ».

5.3.1 Introduction au concept de calibration et d'agrégation du jugement d'expert

La calibration des avis experts est une étape qui consiste à évaluer et pondérer les avis experts par rapport à des variables dont les vraies valeurs sont connues. Ces dernières s'appellent « variables de calibration ». Cette procédure permet de caractériser les experts en tant que sources d'information, en accordant à leurs estimations un poids de calibration qui d'un côté, reflète la qualité et la quantité de l'information donnée par chaque expert et, d'un autre côté, permet de pondérer les estimations des experts en vue de les combiner en un seul avis (O'Hagan et *al.*, 2006). Il est utilisé ensuite pour pondérer et combiner des avis experts donnés sur des variables d'intérêt dont les vraies valeurs sont inconnues.

O'Hagan et *al.* (2006) associe les différents modèles de calibration aux modèles d'agrégation des avis experts. Il distingue entre deux approches d'agrégation : une approche d'agrégation mathématique et une approche d'agrégation comportementale. L'approche mathématique contient plusieurs modèles comme la méthode bayésienne, le regroupement d'opinions et la méthode classique de Cooke (O'Hagan et *al.*, 2006). L'approche comportementale constitue en un groupe d'élicitation ou panel d'expert ayant comme objectif de fournir une seule réponse par consensus (O'Hagan et *al.*, 2006).

Dans le cadre scientifique de notre recherche, nous nous intéressons aux modèles mathématiques d'agrégation et de calibration des avis experts comme le modèle classique de calibration de Cooke (1991) et le modèle d'agrégation des avis experts de Lichtendahl et *al.* (2013). En effet le modèle de Cooke (1991) permet, d'un côté de réaliser une analyse rigoureuse en vue d'attribuer un poids de calibration à chaque expert du panel pour les caractériser en tant que sources d'information et, d'un autre côté il est possible de l'associer à d'autres modèles mathématiques de traitement de jugement d'expert dans l'objectif d'agréger les avis experts calibrés. Aussi le modèle d'agrégation des avis experts de Lichtendahl et *al.* (2013) permet d'agréger les avis experts donnés sous format probabiliste et de déterminer un seul avis expert agrégé. Dans la suite nous aborderons en détail les principes de ces deux modèles de calibrations et d'agrégation des avis experts.

5.3.2 Modèle classique de calibration des avis experts (Cooke, 1991)

Le modèle classique de calibration de Cooke (1991) est un des modèles mathématiques de calibration des avis experts développé dans le domaine statistique que nous souhaitons utiliser et adapter à notre contexte d'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues. Ce modèle fait l'objet de nombreuses publications (Cooke, 1991 ; Cooke and Goossens, 2000 ;

Pigeon, 2008). Il est basé sur des « variables de calibration », proches de la variable pour laquelle on mobilise les experts, mais dont les valeurs sont connues par l'analyste. Ces variables sont évaluées par les experts sous la forme d'intervalles d'incertitude. Elles permettent de calculer, mathématiquement, pour chaque expert, un poids de calibration reflétant la précision et la justesse de l'information portées par son jugement. Il se détermine par la multiplication des deux scores : *Score d'entropie* et *score de calibration*. En outre, il permet de calibrer et combiner mathématiquement le jugement expert donné sur des variables d'intérêt dont les valeurs sont inconnues et entachées par des incertitudes et des biais.

1. Le *score d'entropie* permet de mesurer la quantité (la précision) d'informations données par l'expert, autrement dit sa capacité à être précis (le moins dispersé) dans ses estimations probabilistes. Mathématiquement, il se calcule par une mesure de distance entre un vecteur de probabilité subjective (s_i) (formé à partir des élicitations expertes) et un vecteur de probabilité théorique (p_i) (formé à partir des quantiles d'intervalle d'incertitude). Nous revenons sur les définitions mathématiques plus tard dans le texte.
2. Le *score de calibration* permet de mesurer la qualité (la justesse) de l'information donnée par l'expert, autrement dit sa capacité à donner une estimation probabiliste juste ou proche des vraies valeurs connues (expérimentales, observées, analytiques…). Mathématiquement, il se calcule par une mesure de distance entre un vecteur de probabilité théorique (p_i) (formé à partir des quantiles d'intervalle d'incertitude) et un vecteur probabiliste de calibration (c_i) (formé à partir des variables de calibration connues et des élicitations expertes). Nous revenons sur les définitions mathématiques plus tard dans le texte.

Le principe du modèle classique de Cooke (1991)

Le modèle classique de Cooke (1991) repose sur le principe d'une mesure de distance « information relative » entre un vecteur de probabilités théoriques (p_i), un vecteur de probabilités subjectives(s_i) et un vecteur de calibration (c_i).

- **Le vecteur de probabilité théorique p_i**

Le vecteur de probabilité théorique représente les probabilités théoriques de chaque intervalle interquantile. Il contient les probabilités de chaque intervalle interquantile concernant les quantiles probabilistes sur lesquels l'expert devrait donner ses élicitations, sur la base de l'échelle théorique de la probabilité [0%,100%].

Les probabilités de ce vecteur se déterminent par le pourcentage de chaque intervalle interquantile relativement à l'échelle théorique de probabilité. Le Tableau 5-2 explique mathématiquement comment ce vecteur se détermine pour un intervalle d'incertitude dont les quantiles probabilistes sont respectivement : 5%, 50% et 95%.

Tableau 5-2. Méthode de calcul du vecteur de probabilité théorique p_i

Intervalle interquantile	$q_{0\%}$ à $q_{5\%}$	$q_{5\%}$ à $q_{50\%}$	$q_{50\%}$ à $q_{95\%}$	$q_{95\%}$ à $q_{100\%}$
Vecteur de probabilité théorique p_i	**5%**	**45%**	**45%**	**5%**

- **Le vecteur de probabilité subjective $\mathbf{s_i}$**

Le vecteur de probabilité subjective représente les probabilités subjectives de chaque intervalle interquantile. Il contient les probabilités subjectives que l'expert assigne implicitement aux intervalles interquantiles lors de l'élicitation de la valeur la plus vraisemblable et de son intervalle d'incertitude pour un ensemble de variables élicitées.

Les probabilités de ce vecteur se déterminent par le pourcentage de chaque intervalle interquantile relativement à l'échelle probabiliste de la variable de calibration. Le Tableau 5-3 explique mathématiquement comment ce vecteur se détermine pour un intervalle d'incertitude dont les quantiles probabilistes sont respectivement : 5%, 50% et 95%.

Tableau 5-3. Méthode de calcul du vecteur de probabilité subjective s_i

Intervalle interquantile	$q_{0\%}$ à $q_{5\%}$	$q_{5\%}$ à $q_{50\%}$	$q_{50\%}$ à $q_{95\%}$	$q_{95\%}$ à $q_{100\%}$
Vecteur de probabilité subjective s_i	$\frac{q_{5\%} - q_{0\%}}{q_{100\%} - q_{0\%}}$	$\frac{q_{50\%} - q_{5\%}}{q_{100\%} - q_{0\%}}$	$\frac{q_{95\%} - q_{50\%}}{q_{100\%} - q_{0\%}}$	$\frac{q_{100\%} - q_{95\%}}{q_{100\%} - q_{0\%}}$

Ce vecteur de probabilité subjective sera utilisé pour mesurer la distance entre la distribution de l'expert et une distribution uniforme non informative.

- **Le vecteur probabiliste de calibration $\mathbf{c_i}$**

Ce vecteur reflète, par rapport à l'intervalle d'incertitude élicité par l'expert, dans quel intervalle interquantile se trouve la vraie valeur de la variable de calibration. Pour chaque variable de calibration et pour chaque intervalle interquantile on distingue deux possibilités :

$$c_i = \begin{cases} 100\%, & \textit{quand un des intervalle interquantile contient la} \text{ vraie } \textit{valeur de la variable de calibration} \\ 0\%, & \textit{ailleurs} \end{cases} \quad [2]$$

Si la vraie valeur connue (variable de calibration) se situe dans un des intervalles interquantiles, la probabilité de cet intervalle prend la valeur 100% ; sinon, elle prend la

valeur 0%. Lorsqu'il y a plusieurs variables de calibration, le vecteur de calibration final sera la moyenne de tous les vecteurs de calibration déterminés. Le vecteur de calibration représente ainsi la proportion de vraies valeurs comprises dans chaque intervalle interquantile.

Dans le modèle classique de Cooke (1991) et pour les quantiles probabiliste 5%, 50% et 95%, une estimation probabiliste à dires d'experts est bonne lorsque la valeur connue (variable de calibration) se retrouve dans son premier intervalle interquantile [0%,5%] dans 5% des cas, dans son second intervalle interquantile [5%, 50%] dans 45% des cas, dans son troisième intervalle interquantile [50%,95%] dans 45% des cas et dans son dernier intervalle interquantile [95%,100%] dans 5% des cas.

- **L'information relative I_e**

La notion des distances utilisées entre ces trois vecteurs est basée sur un concept issu de la statistique classique, il s'agit de « l'*information relative* » entre deux vecteurs (Cooke, 1991). L'information relative permet de calculer les paramètres nécessaires pour la détermination du score de calibration $\boldsymbol{C}_e$ et du score d'entropie $\boldsymbol{K}_{\mathrm{e}}$ (Cooke, 1991). Pour plus de détail, le lecteur intéressé par la base statistique de cette notion « l'information relative » pourra consulter Kullback (1997).

La distance entre le vecteur de probabilité théorique p_i et celui de la calibration c_i permet de calculer la composante de la calibration $\boldsymbol{C}_e$. Cette distance de l'information relative $I_e(c_i, p_i)$ prend la forme :

$$I_e(c_i, p_i) = \sum_{i=1}^{j} c_i \ln\left(\frac{c_i}{p_i}\right) \qquad [3]$$

La distance entre le vecteur de probabilité subjective s_i et celui de la probabilité théorique p_i permet de calculer la composante d'entropie $\boldsymbol{K}_{\mathrm{e}}$. Cette distance de l'information relative $I_e(p_i, s_i)$ prend la forme :

$$I_e(p_i, s_i) = \sum_{i=1}^{j} p_i \ln\left(\frac{p_i}{s_i}\right) \qquad [4]$$

où :

$I_e(c_i, p_i)$: l'information relative entre le vecteur de probabilités théoriques p_i *et* le vecteur de calibration c_i

$I_e(p_i, s_i)$: l'information relative entre le vecteur de probabilités subjectives s_i et le vecteur de probabilités théoriques p_i

p_i : le vecteur de probabilités théoriques

c_i : le vecteur de calibration

s_i : le vecteur de probabilités subjectives

e : le numéro désignant l'expert

i : le nombre d'intervalle interquantile

- **Le score de calibration C_e**

Le score de calibration permet d'évaluer la qualité (la justesse) de l'information donnée par l'expert. Il se détermine par le complément d'une probabilité d'erreur $P(\mathcal{X}^2)$ qui se détermine par le test statistique ki2 (test d'interdépendance).

Le test ki2 permet d'évaluer si une interdépendance existe entre deux distributions. Il permet de comparer une distribution observée (dans notre cas la distribution donnée par l'expert) à une distribution théorique (dans notre cas la distribution théorique sur laquelle l'expert donne ses élicitations) (Corner, R.C et Corner, T.R, 1994). En d'autres termes, l'objectif est de calculer une probabilité d'erreur quand la vraie valeur ne se situe pas à l'intérieur de l'intervalle d'incertitude de l'expert. Moins les vraies valeurs se situent à l'intérieur de la distribution observée (données par les experts), plus la probabilité d'erreur est élevée et par conséquent le score de calibration est faible. La fonction de répartition de la loi ki2 ($\mathcal{X}^2$) se donne par la formule suivante :

$$C_e = 1 - P\big(2 * n * I_e(c_i, p_i)\big) = 1 - \mathcal{X}^2\big(2 * n * I_e(c_i, p_i)\big) \qquad [5]$$

où :

$\mathcal{X}^2\big(2 * n * I_e(c_i, p_i)\big)$: la fonction de répartition d'une variable $\big(2 * \mathrm{n} * I_e(c_i, p_i)\big)$ selon la loi ki2

$\mathrm{p}\big(2 * n * I_e(c_i, p_t)\big)$: la probabilité d'une variable aléatoire $\big(2 * \mathrm{n} * I_e(c_i, p_i)\big)$ suivant une loi ki2

n : le nombre de variable de calibration

$I_e(c_i, p_i)$: l'information relative entre un vecteur de probabilité théorique p_i et un vecteur de calibration c_i

c_i : le vecteur de calibration

p_i : le vecteur de probabilités théoriques;

e : le numéro désignant l'expert

i : le nombre d'intervalle interquantile

- **Le score d'entropie K_e**

Le score d'entropie permet de mesurer la quantité d'informations contenues dans les distributions probabilistes données par les experts. Elle s'appuie sur une mesure de distances entre le vecteur de probabilités subjectives s_i et le vecteur de probabilités théoriques p_i.

$$K_e = \frac{1}{n}\sum_{\mathrm{i}=1}^{j} I_{e,n}(p_i, s_i) \qquad [6]$$

où :

$I_e(p_i, s_i)$: l'information relative entre le vecteur de probabilités subjectives s_i et le vecteur de probabilités théoriques p_i

s_i : le vecteur de probabilités subjectives $i \in [1, z]$

p_i : le vecteur de probabilités théoriques $i \in [1, z]$

n : le nombre de variable de calibration

e : le numéro désignant l'expert

i : le nombre d'intervalle interquantile

- **Le poids de calibration $\mathbf{w_e}$**

Le poids de calibration permet de pondérer directement les avis experts les uns par rapport aux autres en tant que sources d'informations. Pour chaque expert d'un panel, le poids de calibration se détermine par le pourcentage entre son poids de calibration propre et la somme pondérée de tous les poids d'experts constituant le panel d'experts. Il prend la formule suivante (Il est à noter que les poids sont toujours positifs et que leur somme est égale à 1) :

$$w_{\mathrm{e}} = \frac{C_{\mathrm{e}}.K_{\mathrm{e}}}{\sum_{\mathrm{e}=1}^{z} C_{\mathrm{e}}.K_{\mathrm{e}}} \qquad [7]$$

où :

w_{e} : le poids final associé aux évaluations probabilistes de chaque expert *e*

C_{e} : la composante de calibration concernant l'expert (e)

K_{e} : la composante d'entropie concernant l'expert (e)

e : le numéro désignant l'expert

z : nombre d'experts

Intérêts et limites

Le modèle classique de Cooke présente plusieurs intérêts :

- Il permet d'avoir via un poids de calibration une idée globale de l'ensemble des biais manifestés lors de l'évaluation experte de variables de calibration données ;

- Il permet de pondérer les évaluations expertes pour une variable connue du même domaine que la variable d'intérêt. Cette pondération se fait d'une part, par le score de calibration permettant d'évaluer la justesse (la qualité) de l'information des estimations probabilistes expertes, et, d'autre part, par le score d'entropie permettant d'évaluer la quantité (la précision) de l'information contenue dans les estimations probabilistes expertes.
- Il permet de combiner les avis experts en un seul avis calibré présenté par une seule valeur.

Néanmoins ce modèle présente les limites suivantes pour notre recherche :

- Le modèle ne permet pas de réaliser un traitement spécifique de biais notamment le biais de sur-confiance ; or, celui-ci est décrit comme prédominant dans la littérature (Lin et Bier, 2008).
- L'objectif final proposé par ce modèle vise à déterminer une seule valeur agrégée calibrée. Cela est limitant lorsqu'on souhaite produire une évaluation de la fiabilité des digues en termes de probabilité de défaillance au moyen d'un intervalle d'incertitude.

5.3.3 Modèle d'agrégation, de calibration et de ré-calibration des probabilités subjectives élicitées à dires d'experts (Ranjan et Gneiting, 2010)

Ranjan et Gneiting (2010) ont développé un modèle général de dé-biaisage (Recalibaration) des avis experts déjà calibrés et agrégés (*modèle Betta de transformation)*. Ce modèle comprend trois phases principales : 1) phase de calibration des avis experts probabilistes, 2) phase d'agrégation des avis experts probabilistes calibrés et, 3) phase de ré-calibration des avis experts probabilistes calibrés et agrégés.

La phase de calibration des avis experts probabilistes consiste à pondérer et calibrer les avis experts par un poids de calibration qui pourrait être déterminé par des méthodes de calibration convenant au contexte d'étude. La phase d'agrégation des avis experts probabilistes calibrés consiste à agréger linéairement (par une addition simple) tous les avis experts calibrés issus de la phase précédente. La phase de ré-calibration des avis experts probabilistes calibrés et agrégés consiste à corriger le résultat issu de la phase précédente par un facteur de correction (facteur de re-calibration) qui pourrait être déterminé par des méthodes convenant au mieux au contexte d'étude, par exemple Ranjan et Gneiting (2010) proposent d'effectuer cette phase par la méthode du maximum de vraisemblance. Ce modèle se présente mathématiquement par la formule suivante :

$$p = H_{\alpha,\beta}\left(\sum_{e=1}^{e} w_e p_e\right) \qquad [8]$$

où :

p : la probabilité finale agrégée, calibrée et ré-calibrée

$H_{\alpha,\beta}$: le coefficient de correction (coefficient de ré-calibration)

p_e : la probabilité subjective élicitée par l'expert e

w_e : le poids de calibration de l'expert e

Les intérêts et les limites

Ce modèle présente plusieurs intérêts

- Ce modèle propose une procédure claire pour une meilleure exploitation du jugement expert. Il consiste en une démarche permettant dans un premier temps de calibrer les avis experts en vue de les agréger puis, dans un second temps, de dé-biaiser (Recalibartion) le résultat en vue de le rendre plus correct ;
- Ce modèle est facile à mettre en place par des démarches de calibration des avis experts permettant de déterminer un poids de calibration aux avis des experts (ces modèles correspondent aux modèles de l'approche mathématique d'agrégation des avis experts proposés par O'Hagan et *al.*, (2006)) ;
- Ce modèle correspond à un modèle général qui ne présente aucun obstacle pour être adapté aux différents contextes d'études comme l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des ouvrages de génie civil, notamment, les ouvrages de protection contre les inondations.

Néanmoins ce modèle présente les limites suivantes pour notre recherche :

- Il traite le cas d'une seule élicitation probabiliste fournie par chaque expert du panel sous forme d'une seule probabilité subjective ; cela exige de le faire adapter au cas plus complexe où les experts fournissent leurs estimations probabilistes accompagnées d'un intervalle d'incertitude ;
- La phase de ré-calibration vise à améliorer le résultat final de l'agrégation linéaire des avis experts déjà calibrés et agrégés mais elle ne prend pas en compte de façon explicite le traitement des biais experts. Cela exige de l'adapter au contexte d'incertitude et du traitement des biais par l'association à d'autres modèles plus spécifiques de traitement de biais experts notamment le biais de sur-confiance.

5.3.4 Modèle d'agrégation des avis experts élicités sous forme d'intervalle d'incertitude (Lichtendahl et *al.*, 2013)

Lichtendahl et al. (2013) ont effectué une étude portant sur la détermination d'un meilleur protocole d'agrégation des avis experts. Il est basé sur le protocole de la moyenne des quantiles des élicitations expertes données sous forme d'intervalles d'incertitude - connu sous le nom de « Vincentization (Ratcliff, 1979 ; Thomas et Ross, 1980)».

Ce protocole s'oppose à la façon la plus courante de combiner les élicitations expertes consistant à moyenner les élicitations expertes par une moyenne simple (Stone, 1961) qui a

toujours été considérée comme une moyenne robuste (Clemen et Winkler, 1986 ; Fildes et Makridakis, 1995 ; Armstrong, 2001 ; Larrick et Soll, 2006).

Par ailleurs, les recherches de Hora (2004) ont montré que lorsque les experts fournissent leurs avis sous forme probabiliste, il n'est pas garanti que la moyenne de ces avis soit calibrée et optimale. En outre, les recherches de Ranjan (2009) ont montré que la moyenne des avis experts fournis sous forme probabiliste est une moyenne sous-confiante car elle peut atteindre des valeurs très élevées qui dépassent les valeurs acceptées. Dans ce contexte les résultats de Lichtendahl et al. (2013) ont montré que la moyenne des quantiles d'intervalle d'incertitude est toujours plus précise et révèle une faible variance par rapport à la moyenne de tous les quantiles d'un seul intervalle d'incertitude.

Au titre d'exemple, pour un intervalle d'incertitude contenant trois quantiles probabilistes (q5%, q50%, q95%) le protocole d'agrégation des avis de *e* experts se présente mathématiquement par les formules suivantes :

$$q_{5\%} = \sum w'_e \cdot q_{5\%_{(e)}} \quad [9]$$

$$q_{50\%} = \sum w'_e \cdot q_{50\%_{(e)}} \quad [10]$$

$$q_{95\%} = \sum w'_e \cdot q_{95\%_{(e)}} \quad [11]$$

où :

e	:	numéro désignant l'expert
q5%	:	quantile ayant une probabilité de 5% élicité par l'expert
q50%	:	quantile ayant une probabilité de 50% élicité par l'expert
q95%	:	quantile ayant une probabilité de 95% élicité par l'expert

Intérêts et limites

Ce protocole d'agrégation des avis experts présente plusieurs intérêts

- le modèle permet de garder la forme initiale des élicitations experts présentée par un intervalle d'incertitude et une valeur la plus vraisemblable.
- ce modèle correspond à un modèle général qui ne présente aucun obstacle pour être adapté aux différents contextes d'études comme l'évaluation probabiliste de la fiabilité des ouvrages de génie civil, notamment, les ouvrages de protection contre les inondations.

Toutefois, ce modèle consiste en un protocole simple d'agrégation des avis experts et n'apporte aucune correction des biais experts susceptibles entacher les élicitations expertes,

ce qui justifie le besoin d'accompagner les démarches de calibration et d'agrégation des avis experts par une démarche spéciale de réduction des biais experts.

5.3.5 Synthèse

L'analyse bibliographique présentée souligne l'importance d'une phase de calibration dans un modèle d'aide à l'évaluation probabiliste à dires d'experts. La calibration permet d'évaluer les avis des experts et de les pondérer en vue de les agréger. La littérature scientifique contient plusieurs modèles de calibration et d'agrégation mathématique ainsi que comportementale. Les modèles mathématiques, plus précisément le modèle Classique de Cooke (1991) présente un intérêt pour notre souhait de développement d'une démarche complète de traitement du jugement expert pour l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à dires d'experts:

1- le modèle permet, via le poids de calibration, d'évaluer la capacité d'un expert à se prononcer pour des variables inconnues d'un domaine d'intérêt. Il apparait donc comme particulièrement intéressant pour notre démarche.
2- Le modèle s'accorde aisément avec les différents protocoles d'élicitation que l'on envisage d'utiliser dans notre travail de recherche pour éliciter à la fois des probabilités courantes et des probabilités rares.
3- Le modèle ne présente aucune contradiction qui pourrait être considérée comme obstacle lors de l'association à une autre méthode mathématique visant à dé-biaiser les avis experts.
4- Ce modèle est compatible, via le poids de calibration, au protocole d'agrégation des avis experts proposé par Lichtendhal et al. (2013).

En outre, la probabilité de défaillance d'un ouvrage de génie civil (soumis à des aléas naturels tels que les inondations et les séismes) ne pourrait pas être déterminée par une seule valeur mais, par un intervalle des valeurs probabilistes (intervalle d'incertitude). Cela exige de traiter et de dé-biaiser les élicitations expertes par rapport à un intervalle de confiance et non pas par rapport à une seule valeur de probabilité. Dès lors, le protocole d'agrégation des avis experts proposé par Lichtendahl et al. (2013) présente un intérêt pour notre souhait de développement d'une démarche complète du traitement du jugement expert puisqu'il permet d'obtenir un intervalle de confiance agrégé de l'ensemble des avis experts, ce qui permet, dans une étape plus avancée, de l'associer aux d'autres démarches plus spécifiques du traitement des biais.

Par ailleurs, le modèle proposé par Lichtendahl et al. (2013) traite la lacune du modèle d'agrégation et de dé-biaisage des avis experts proposé par Ranjan et Gneiting (2010) au niveau de la deuxième phase (phase d'agrégation des avis experts). En d'autres termes, on peut remplacer la phase d'addition simple des probabilités subjectives proposée par Ranjan et Gneiting (2010) par le protocole d'agrégation selon la moyenne des quantiles proposé par Lichtendahl et al. (2013).

In fine, la procédure de calibration des avis experts est une procédure ayant comme objectif d'agréger d'une manière rigoureuse les différents avis experts. Elle contribue à un traitement

préliminaire de l'ensemble des biais susceptibles d'entacher les avis experts. Dès lors, la question qui se pose est comment est-il possible d'améliorer le résultat agrégé-calibré et, de corriger d'avantage les biais experts ? La réponse à cette question fera l'objectif de sous-chapitre suivant « *Méthodes de dé-biaisage des avis experts* ».

5.4 Méthodes de dé-biaisage du jugement d'expert

La réduction de biais « *est une procédure ayant comme objectif de réduire ou d'éliminer les biais entachant le jugement d'un décideur, des biais qui ont été causés par les stratégies cognitives adoptées par l'expert lors de la prise de décision* (Arnott, 2002) ». Pour Morewedge et *al.*, (2015) **la réduction des biais** « *est une intervention peu coûteuse et efficace pour améliorer la prise de décision et réduire les erreurs coûteuses qui produisent des biais de décisions* ». Dans notre contexte de recherche nous proposons de désigner cette phase par le mot « dé-biaisage » lors de laquelle nous souhaitons conduire une procédure supplémentaire et complémentaire à la démarche d'élicitation et celle de la calibration des avis experts et ayant comme objectif d'améliorer la prise de décision, par la réduction des biais cognitifs entachant le jugement subjectif, d'un expert, donné dans un contexte d'évaluation marqué par une forte incertitude et un comportement de défaillance complexe du système en mode dévaluation.

5.4.1 Introduction au concept de dé-biaisage du jugement expert

Plusieurs recherches ont proposé des méthodes mathématiques dédiées à la réduction des biais cognitifs comme : Shlyakhter et *al.* (1994) et Clemen et Lichtendahl (2002). Ces méthodes sont basées sur les travaux de Cox (1958), Morris (1974) et Harrison (1977) concernant la réduction des biais par une démarche spécifique après une phase d'élicitation des dires d'experts. Sous le nom de « Debiasing » cette démarche réserve sa place dans le domaine d'évaluation probabiliste utilisant le jugement expert comme source de données.

Dans le cadre scientifique de notre recherche nous nous intéressons aux modèles mathématiques de dé-biaisage des avis experts dans le but de les associer à d'autres modèles mathématiques de traitement de jugement expert. Dans la suite nous nous focalisons et nous abordons les principes des modèles mathématiques de dé-biaisage des biais de sur-confiance des avis experts selon Shlyakhter et *al.* (1994) et selon Clemen et Lichtendahl (2002).

5.4.2 Modèle mathématique de dé-biaisage de biais de sur-confiance des avis experts selon Shlyakhter et al. (1994)

Shlyakhter *et al.* (1994) dans le domaine des prédictions et des prévisions énergétiques ont développé un modèle permettant de corriger le biais cognitif de « sur-confiance » entachant les avis experts lors d'une estimation de nouvelles prévisions énergétiques. Ce modèle avait aussi comme objectif d'être appliqué à tous les domaines pour lesquels des prédictions sont disponibles.

Dans ce modèle, les experts donnent leurs estimations probabilistes sous forme d'intervalles d'incertitude, en précisant une valeur la plus vraisemblable. Shlyakhter *et al.* (1994) proposent de corriger le biais de sur-confiance entachant ces estimations par un facteur d'inflation Z (coefficient de correction). Ce facteur permet le cas échéant d'élargir l'intervalle d'incertitude dans le but d'avoir une enveloppe des valeurs susceptibles de contenir la vraie valeur recherchée.

Le facteur d'inflation se détermine par le pourcentage entre deux valeurs normalisées ayant une probabilité de 10% : 1) une valeur normalisée obtenue par une fonction de répartition probabiliste qui suit une loi normale avec une moyenne μ et un écart-type σ, elle déterminée à partir des élicitations expertes et, 2) une valeur normalisée obtenue par une fonction de répartition probabiliste qui suit une loi normale standard (loi normale centrée réduite) avec une moyenne $\mu = 0$ et un écart-type $\sigma = 1$.

Le principe du modèle consiste à distinguer entre deux cas: 1) un cas pour lequel on dispose de beaucoup de données à dires d'experts et, 2) un cas pour lequel on ne dispose pas de beaucoup de données à dires d'experts. Le premier cas exige de modéliser par une fonction de répartition probabiliste les élicitations expertes, le deuxième cas exige de supposer, par l'analyste même, une fonction de répartition probabiliste en supposant une moyenne convenable aux élicitations expertes.

Le concept mathématique du modèle

Pour faciliter l'explication et rendre la présentation mathématique plus compréhensive, on présente ci-dessous les paramètres du modèle :

L, R, U : les élicitations expertes données sous une forme d'intervalle d'incertitude contenant respectivement les valeurs : L : faible (Low), R : référence (Reference) et U : élevé (Upper)

T : la vraie valeur (variable connue, variable de calibration)

x : la mesure normalisée de l'écart entre les valeurs élicitées *R* et la vraie valeur *T*

$$x = \frac{(T - R)}{\Delta}$$

u : une fonction de répartition probabiliste des élicitations expertes qui suit une loi normale avec une moyenne μ et un écart-type σ

Δ : l'écart type concernant les élicitations expertes biaisées $\Delta = \left(\frac{U-L}{2}\right)$

Δ' : l'écart type concernant les élicitations expertes dé-biaisées $\Delta = \left(\frac{U^*-L^*}{2}\right)$; où U^* et L^* sont respectivement les bornes inférieure et supérieure dé-biaisées de l'intervalle d'incertitude

Z : le facteur d'inflation

L'application du modèle repose sur trois phases principales : 1) la phase d'élicitation des dires d'experts, 2) la phase de construction d'une fonction de répartition probabiliste et, 3) la phase de réduction des biais de sur-confiance.

a) La phase d'élicitation à dires d'experts

Cette phase consiste à éliciter par l'expert, pour une variable de calibration une série des valeurs contenant la valeur la plus vraisemblable *R* et son intervalle d'incertitude [L,U].

Idéalement, il faut avoir beaucoup d'élicitations expertes individuelles (au moins 100 élicitations).

b) La phase de construction d'une fonction de répartition probabiliste

Cette phase consiste à présenter les élicitations expertes de la phase précédente par une fonction de répartition probabiliste. On distingue deux cas (Tableau 5-4) :

Tableau 5-4. Les deux cas à distinguer selon le modèle de Shlyakhter *et al.* (1994)

Cas 1 *(on dispose de beaucoup de données à dires d'experts)*	**Cas 2** *(on ne dispose pas de beaucoup de données à dires d'experts)*
1- Modéliser les élicitations expertes par une fonction de répartition probabiliste en utilisant la moitié de l'intervalle d'incertitude pour déterminer l'écart-type $\Delta = \left(\frac{U-L}{2}\right)$ 2- Calculer pour chacune des élicitations expertes la mesure normalisée $x = \frac{(T-R)}{\Delta}$ 3- Présenter ces mesures normalisées par une courbe d'une fonction de répartition probabiliste	Déterminer, par l'analyste, une fonction de répartition probabiliste en supposant une moyenne μ convenable aux élicitations. Par exemple : ▪ pour les constantes physiques $\mu = 1$; ▪ pour les projections d'énergie $\mu =$ 1 à 3.5 ; ▪ pour les projections démographiques $\mu = 3$.

c) La phase de réduction du biais de sur-confiance

Cette phase consiste à calculer le facteur d'inflation Z afin de déterminer les intervalles de confiance modifiés (la borne inférieure dé-biaisée (L^*) et supérieure dé-biaisée (U^*)). La borne inférieure dé-biaisée L^* de l'intervalle d'incertitude se calcule par la formule suivante :

$$L^* = R - Z(R - L) \qquad [12]$$

De la même manière, la borne supérieure dé-biaisée U^* de l'intervalle d'incertitude se calcule par la formule suivante :

$$U^* = R + Z(U - R) \qquad [13]$$

Mathématiquement, le facteur d'inflation se détermine par le pourcentage entre deux valeurs $x_{\mu\,\mu}$ et $x_{\mu\,0}$ ayant une probabilité de 10% : 1) $x_{\mu\,\mu}$ est une valeur normalisée obtenue par la fonction de répartition probabiliste des élicitations expertes et, 2) $x_{\mu\,0}$ est une valeur normalisée obtenue par une fonction de répartition probabiliste qui suit une loi normale

standard (loi normale centrée réduite) avec une moyenne $\mu = 0$ et un écart-type $\sigma = 1$. Le facteur d'inflation Z se calcul par la formule suivante :

$$Z = \frac{\boldsymbol{x}_{\mu\,\mu}}{\boldsymbol{x}_{\mu\,\mathbf{0}}} \qquad [14]$$

Intérêts et limites

Le modèle permet de dé-biaiser et réduire le biais de sur-confiance susceptibles d'entacher les élicitations expertes à partir d'un seul facteur d'inflation. Ce facteur permettant d'élargir l'intervalle d'incertitude pour créer une enveloppe plus large, réduisant ainsi significativement le biais de sur-confiance. Toutefois ce modèle présente les limites suivantes :

1- Le fait de considérer que la valeur la plus vraisemblable R est équivalente à la vraie valeur T, et par conséquent, de ne pas lui apporter de correction, constitue un point faible dans la procédure de dé-biaisage de ce modèle. En effet, la valeur R est une valeur élicitée par l'expert même et peut être donc entachée par des biais (notamment le biais de sur-confiance ou sous-confiance).
2- le fait de dé-biaiser les deux bornes de l'intervalle d'incertitude par le même facteur de correction pourrait provoquer une erreur, car par exemple, il est possible que l'expert ait un biais de sur-confiance lié à la borne inférieure de son intervalle d'incertitude (L), et, inversement ait un biais de sous-confiance lié à la borne supérieure de son intervalle d'incertitude (U). Ce qui mène en final à une correction identique pour deux types de biais différents à un résultat final erroné.
3- Le fait de supposer que les incertitudes suivent nécessairement une loi normale n'est pas adaptable au contexte des ouvrages de protection contre les inondations, puisque leurs incertitudes épistémiques dépendent du comportement de plusieurs paramètres physiques qui ne suivent pas forcément un comportement linéaire.
4- Le modèle permet de traiter les élicitations consensuelles données par un panel d'expert ou individuellement par un seul expert. Il ne propose aucune procédure pour utiliser en même temps plusieurs élicitations expertes individuelles.

5.4.3 Modèle mathématique de dé-biaisage de biais de sur-confiance des avis experts selon Clemen et Lichtendahl (2002)

Clemen et Lichtendahl (2002) se sont basés sur le principe du modèle de Shlyakhter et *al.* (1994) et ont développé un modèle bayésien plus complet de réduction des biais, permettant l'identification et la réduction du biais de sur-confiance susceptible d'entacher les élicitations à dires d'experts.

Ce modèle requiert que d'une part, l'expert élicite pour plusieurs variables de calibration la valeur la plus vraisemblable (R_i) et son intervalle d'incertitude $[L_i, U_i]$, et d'autre part, que l'analyste calcule des facteurs d'inflation (coefficients de correction) afin de dé-biaiser et de

déterminer la variable la plus vraisemblable dé-biaisée (R_i^*) et chacune des bornes de l'intervalle d'incertitude dé-biaisée [L_i^*, U_i^*].

L'application de ce modèle se réalise à l'aide des coefficients de correction ($\alpha_L, \beta, \alpha_U$) permettant de calculer des distances entre d'une part les valeurs biaisées élicitées par l'expert (L_i, R_i, U_i) et d'autre part, les valeurs dé-biaisées (L_i^*, R_i^*, U_i^*). Les coefficients de correction se déterminent par une approche bayésienne à partir d'une distribution a priori pour chaque coefficients de correction. Cette approche met en œuvre un estimateur du maximum de vraisemblance mis en œuvre numériquement par des simulations de Monte-Carlo par chaîne de Markov (MCMC). *In fine*, la médiane de chacune des distributions a posteriori reflète la valeur de chaque facteur d'inflation recherché, et avec lesquelles la valeur la plus vraisemblable et son intervalle d'incertitude seront corrigés.

Le concept mathématique du modèle

Pour faciliter l'explication et rendre la présentation mathématique plus compréhensive, nous résumons ci-dessous les paramètres du modèle:

L, R, U : les élicitations expertes données sous une forme d'intervalle d'incertitude contenant respectivement les valeurs : L : faible (Low), R : référence (Reference) et U : élevé (Upper)

α_L : le coefficient de correction concernant la borne inférieure de l'intervalle d'incertitude, élicitée par l'expert

β : le coefficient de correction concernant la valeur la plus vraisemblable élicitée par l'expert

α_U : le coefficient de correction concernant la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude, élicitée par l'expert

L_i^* : la borne inférieure de l'intervalle d'incertitude dé-biaisée

R_i^* : la valeur la plus vraisemblable dé-biaisée

U_i^* : la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude dé-biaisée

Le modèle mathématique repose sur la définition de coefficients de correction pour évaluer la borne inférieure dé-biaisée L_i^* et la borne supérieure U_i^* dé-biaisée de l'intervalle d'incertitude par rapport à la valeur la plus vraisemblable dé-biaisée R_i^*. La valeur la plus vraisemblable dé-biaisée R_i^* est évaluée directement par la valeur la plus vraisemblable R_i dé-biaisée par le facteur d'inflation β. Elle se présente sous la forme :

$$R_i^* = \beta\, R_i \qquad [15]$$

ou par rapport au coefficient de correction $\beta \rightarrow \beta = \frac{R_i^*}{R_i}$ [16]

La borne inférieure dé-biaisée L_i^* est définie par rapport à la valeur la plus vraisemblable dé-biaisée R_i^*. Elle est obtenue par la différence entre, d'une part la variable la plus vraisemblable dé-biaisée R_i^* et, d'autre part par la distance dé-biaisée par le facteur α_L entre la valeur la plus vraisemblable R_i biaisée et la borne inférieure de l'intervalle d'incertitude L_i biaisée. Elle se présente sous la forme :

$$L_i^* = R_i^* - \alpha_L(R_i - L_i) = \beta R_i - \alpha_L(R_i - L_i) = (\beta - \alpha_L)R_i + \alpha_L L_i \quad [17]$$

ou par rapport au coefficient de correction $\alpha_L \rightarrow \alpha_L = \frac{R_i^* - L_i^*}{R_i - L_i}$ [18]

En fait, le facteur α_L ne correspond donc pas à une correction directe de L_i^* par rapport à L_i, mais à un facteur multiplicateur permettant de passer de l'écart $(R_i - L_i)$ à $(R_i^* - L_i^*)$.

De même, la borne supérieure dé-biaisée U_i^* est définie par rapport à la valeur la plus vraisemblable R_i^*. Elle est obtenue par la somme entre, d'une part la variable la plus vraisemblable dé-biaisée R_i^*, et d'autre part par la distance dé-biaisée par le facteur α_U entre la borne supérieure U_i biaisée et la valeur la plus vraisemblable R_i biaisée. Elle se présente sous la forme :

$$U_i^* = R_i^* + \alpha_U(U_i - R_i) = \beta R_i + \alpha_U(U_i - R_i) = (\beta - \alpha_U)R_i + \alpha_U U_i \quad [19]$$

ou par rapport au coefficient de correction $\alpha_L \rightarrow \alpha_U = \frac{U_i^* - R_i^*}{U_i - R_i}$ [20]

En fait, le facteur α_U ne correspond donc pas à une correction directe de U_i^* par rapport à U_i, mais à un facteur multiplicateur permettant de passer de l'écart $(U_i - R_i)$ à $(U_i^* - R_i^*)$.

La Figure 5-2 représente les variables dé-biaisées L_i^*, R_i^*, U_i^* en fonction des coefficients de correction $\alpha_L, \beta, \alpha_U$.

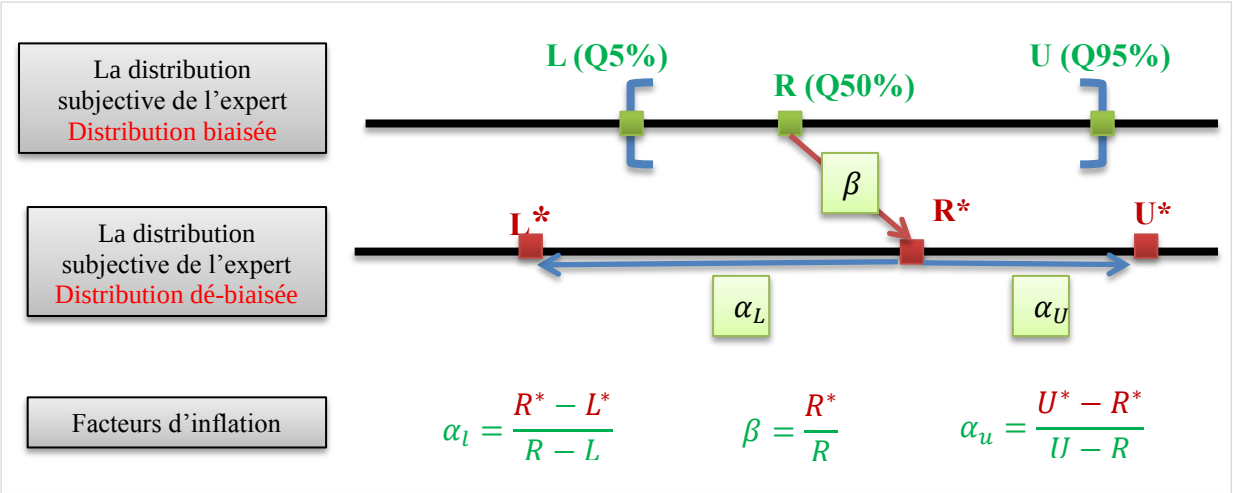


Figure 5-2. Représentation des variables dé-biaisées par les coefficients de correction par rapport aux variables biaisées

Intérêts et limites

Les intérêts du modèle :

1. Le modèle permet de réduire le biais de sur-confiance entachant les élicitations expertes pour la valeur la plus vraisemblable et son intervalle d'incertitude à partir de l'exploitation des évaluations de l'expert pour un certain nombre de variables de calibration.
2. Il permet de prendre en compte les différentes incertitudes autour de la variable la plus vraisemblable et son intervalle d'incertitude d'une manière mathématique précise.

Toutefois ce modèle a comme but de déterminer des coefficients de correction dans l'objectif d'agrandir l'intervalle d'incertitude et donc par conséquent de traiter uniquement le cas de sur-confiance. Cela n'est pas adapté au contexte des digues, car par exemple, il est possible que l'expert ait un biais de sur-confiance lié à la borne inférieure de son intervalle d'incertitude (L), et, inversement ait un biais de sous-confiance lié à la borne supérieure de son intervalle d'incertitude (U). Une telle situation à une correction identique pour deux types de biais différents et un résultat final erroné.

5.4.4 Synthèse

La bibliographie présentée montre l'importance d'une phase mathématique explicite de réduction des biais dans un modèle d'aide à l'évaluation probabiliste à dires d'experts. La réduction des biais permet de corriger l'effet des biais cognitifs entachant les évaluations probabilistes de l'expert.

Dans la littérature scientifique, les modèles mathématiques sont peu nombreux par rapport aux approches psychologiques visant à dé-biaiser les avis des experts lors de la phase d'élicitation des avis experts. Dans notre recherche, la présence d'un tel modèle mathématique de réduction de biais se présente comme une nécessité afin d'améliorer et

d'affiner le résultat issus de notre démarche complète pour l'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales à dire d'experts. Dès lors, nous faisons le choix de privilégier le principe du modèle mathématique de dé-biaisage du biais de sur-confiance des avis experts selon Clemen et Lichtendahl (2002) pour plusieurs raisons :

1- Le principe du modèle est adaptable au contexte de l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues car il permet de corriger l'avis expert incertain du biais de sur-confiance susceptible de l'entacher.
2- Le principe du modèle ne présente aucune contradiction qui pourrait être considérée comme obstacle lors de l'association à une autre méthode mathématique de calibration et d'agrégation des avis experts (également envisagées dans notre travail de recherche).

5.5 Récapitulatif des méthodes de traitement des biais du jugement d'expert

Les différentes méthodes d'utilisation et de traitement des biais du jugement d'expert citées dans le panorama bibliographique sont récapitulées dans le Tableau 5-5 selon les catégories de biais traités, la typologie de biais traités, la phase de traitement et le type de traitement proposé.

Tableau 5-5. Tableau de recensement des travaux sur le traitement des biais entachant le jugement expert

Référence	Catégorie de biais traités	Typologie de biais traités	Phase de traitement	Type de traitement proposé	Détails sur la procédure de traitement
Vick (2002)	Les biais cognitifs	Biais de sur-confiance	Phase d'élicitation	La décomposition	Décomposer le problème en plusieurs petits problèmes. Ce qui participe à décomposer les incertitudes liées au contexte d'évaluation, et, facilite l'évaluation probabiliste.
Soll et Klayman (2003)	Les biais cognitifs	Biais de sur-confiance	Phase d'élicitation	Modalité d'élicitation spéciale	Eliciter d'abord l'intervalle d'incertitude (en commençant par la borne inférieure puis supérieure), puis éliciter la valeur la plus vraisemblable.
Koehler et Harvey (2004)	Les biais cognitifs	Toutes typologies de biais cognitifs	Phase d'élicitation	Stratégies cognitives	Aider les experts à bien formuler leurs estimations probabilistes en les formant en statistique et au problème de biais susceptibles d'entacher leurs élicitations.
	Les biais motivationnels	Toutes typologies de biais motivationnels	Phase d'élicitation	Stratégies motivationnelles	Aider les experts à bien formuler leurs estimations probabilistes : en leur assignant des incitations et en leur accordant une responsabilité liée à leurs avis.
	Les biais techniques	Toutes typologies de biais techniques	Lors de la phase d'élicitation	Stratégies technologies	Utiliser un panel d'experts pour le recueil des dires d'experts. Et autres démarches spécifiques pour l'aide à la décision multicritères.
Vuillet (2012)	Les biais cognitifs	Les biais de : disponibilité représentation sur-confiance	Phase d'élicitation	Plusieurs modalités d'élicitation	Des modalités d'élicitation et de recueil des dires d'experts, principalement via une adaptation des approches de Vick (2002)

Référence	Catégorie de biais traités	Typologie de biais traités	Phase de traitement	Type de traitement proposé	Détails sur la procédure de traitement
		ancrage			et Soll et Klayman (2003). Il propose également un manuel d'élicitation et d'utilisation des probabilités subjectives.
Cooke (1991)	Les biais cognitifs	Toutes typologies de biais cognitifs	Poste élicitation (calibration)	Modèle mathématique pour la calibration des avis experts	Evaluer la justesse et la précision des avis experts. Calibrer les avis des experts en utilisant des variables de calibration (valeur connue). Caractériser les experts en tant que sources d'information en accordant à leurs avis un poids de calibration.
Ranjan et Gneiting (2010)	Les biais cognitifs	Toutes typologies de biais cognitifs et le biais de sur-confiance	Calibration (Poste élicitation)	Modèle d'agrégation, de calibration des avis experts et de ré-calibration des avis experts calibrés	Déterminer un poids de calibration à chaque avis expert permettant de les calibrer et de les agréger pour avoir un seul avis calibré. Puis, déterminer un facteur de correction permettant de ré-calibrer l'avis experts agrégé et de réduire le biais de sur-confiance susceptible de l'entacher.
Lichtendahl et al. (2013)	Les biais cognitifs	Toutes typologies de biais cognitifs	Agrégation (Poste élicitation)	Modalité d'agrégation linéaire des avis experts	Déterminer une seule distribution probabiliste en calculant la moyenne des quantiles probabilistes.
Shlyakhter et al. (1994)	Les biais cognitifs	Le biais de sur-confiance	Dé-biaisage (Poste élicitation)	Corriger mathématiquement la distribution probabiliste élicitée à dires d'experts par un seul facteur d'inflation	Calculer un seul facteur d'inflation permettant de corriger la borne inférieure ainsi que la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude (élicité par l'expert).
Clemen et Lichtandahl (2002)	Les biais cognitifs	Le biais de sur-confiance	Dé-biaisage (Poste élicitation)	Corriger mathématiquement la distribution probabiliste élicitée à dires d'experts par trois facteurs d'inflation	Calculer trois facteurs d'inflation permettant de corriger la valeur la plus vraisemblable et la borne inférieure ainsi que la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude (élicité par l'expert).

5.6 **Synthèse**

La construction d'une démarche complète d'aide à l'évaluation probabiliste à partir des dires d'experts est une procédure délicate et devrait tenir compte des phases suivantes :

- phase d'élicitation : elle permet le recueil des avis experts incertains ;
- phase de calibration : elle permet de caractériser les experts en tant que sources d'information en accordant à leurs avis un poids de calibration ;
- phase d'agrégation : elle permet de rassembler tous les avis experts afin d'obtenir *in fine* un seul avis expert agrégé ;
- phase de réduction des biais : elle permet de corriger les biais cognitifs entachant les évaluations probabilistes de l'expert.

Ces phases ne sont pas indépendantes les unes des autres, la procédure d'élicitation des avis experts ainsi que le protocole de calibration et d'agrégation des avis experts influencent d'une manière directe la démarche de la réduction des biais experts.

Après une recherche approfondie dans plusieurs disciplines traitant la question des biais cognitifs entachant les évaluations expertes, nous constatons que la littérature scientifique traite ce problème par des démarches séparées d'élicitation, de calibration, d'agrégation et de réduction des biais experts. En d'autres termes, ces démarches n'ont pas été regroupées ensemble en une seule démarche et ont été mises en œuvre séparément les unes des autres.

La littérature psychologique met en place plusieurs stratégies permettant d'améliorer les procédures d'élicitation des avis experts. Elles se concentrent sur le comportement des experts lors de la phase d'élicitation dans un souci de créer des conditions favorables pour permettre aux experts de bien exprimer leurs jugements, reflétant fidèlement leurs croyances accordées aux valeurs à évaluer. Ce contexte psychologique a été également pris en compte par une démarche de décomposition (Vick, 2002) permettant de décomposer un problème complexe en plusieurs sous-problèmes plus simples et conduisant à réaliser plusieurs évaluations liées à une série de petits problèmes moins complexes au lieu de faire une seule évaluation liée à un seul problème complexe.

La littérature statistique propose plusieurs modèles mathématiques permettant de calibrer et de pondérer les jugements experts et de les agréger afin d'obtenir un seul jugement final. Cette évaluation du jugement expert réalisée par les méthodes de calibration permet d'évaluer la justesse et la précision d'informations données par les experts ; dans ce contexte le modèle classique de Cooke (1991) permet d'évaluer les élicitations expertes en se basant sur l'évaluation mathématique de la quantité (la précision) et de qualité (la justesse) d'informations données par l'expert. Ces modèles n'exigent pas l'utilisation d'un modèle spécifique pour éliciter les avis experts.

Par ailleurs, la littérature statistique met en place plusieurs modèles de réduction des biais cognitifs entachant le jugement d'expert comme le modèle de dé-biaisage des avis experts de Shlyakhter *et al.* (1994) et le modèle de dé-biaisage des avis experts de Clemen et Lichtendahl (2002). Ces derniers visent à améliorer, par des coefficients de correction, le résultat final d'une démarche d'évaluation probabiliste basée sur le jugement d'expert.

La littérature en génie civil ne fournit aucune démarche probabiliste complète permettant d'évaluer à partir des dires d'experts la fiabilité structurelle des ouvrages pour lesquels un manque de données et un contexte ayant une forte incertitude conditionnent leurs évaluations probabilistes. Dès lors, notre ambition scientifique de recherche est de développer une démarche complète du traitement du jugement d'expert pour les digues qui pourrait être éventuellement utilisée dans plusieurs disciplines du génie civil. Dans ce contexte, notre thèse nécessite :

1. d'adapter les méthodes et les modèles scientifiques, issues de la littérature psychologique et statistique, à notre contexte de génie civil et de les appliquer au contexte des ouvrages de protection contre les inondations – les digues fluviales.
2. d'appliquer les quatre phases de recueil et d'exploitation des avis experts : l'élicitation, la calibration, l'agrégation et le dé-biaisage mathématisé des biais cognitifs entachant les dires d'experts au contexte des ouvrages de protection contre les inondations – les digues fluviales.

Cette ambition scientifique vise à dépasser l'étape classique du diagnostic qualitatif du niveau de sûreté des ouvrages des protections contre les inondations (Peyras (2003) ; Fauchard et Mériaux (2004) ; Serre (2005) ; Vuillet (2012)), pour permettre l'évaluation probabiliste d'un risque de défaillance vis-à-vis des différents mécanismes de rupture.

6 Proposition d'une démarche de traitement du jugement d'expert pour l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert

L'élicitation, la calibration, l'agrégation, le dé-biaisage sont les quatre approches constituant le cœur scientifique de notre proposition d'une démarche complète de traitement du jugement expert permettant l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des ouvrages de protection contre les inondations. Notre démarche vise à l'exploitation du jugement expert probabiliste, dans un contexte d'évaluation caractérisé par de faibles quantités des données disponibles et de comportement complexe des digues.

Ces quatre approches ont été développées et mises en œuvre dans des différentes disciplines comme l'économie, la statistique, l'aéronautique, la psychologique et l'ingénierie. Ces démarches partagent entre elles un objectif commun correspondant à trouver le meilleur traitement des biais entachant le jugement expert. Dans ce contexte, notre objectif est d'adapter ces quatre approches au contexte du génie civil - notamment les digues fluviales - afin d'élaborer par la suite une démarche complète pour l'évaluation de la fiabilité structurelle des digues à partir du jugement d'expert. Le schéma suivant représente par des objectifs, les besoins du domaine du génie civil pour l'élaboration de cette démarche complète.

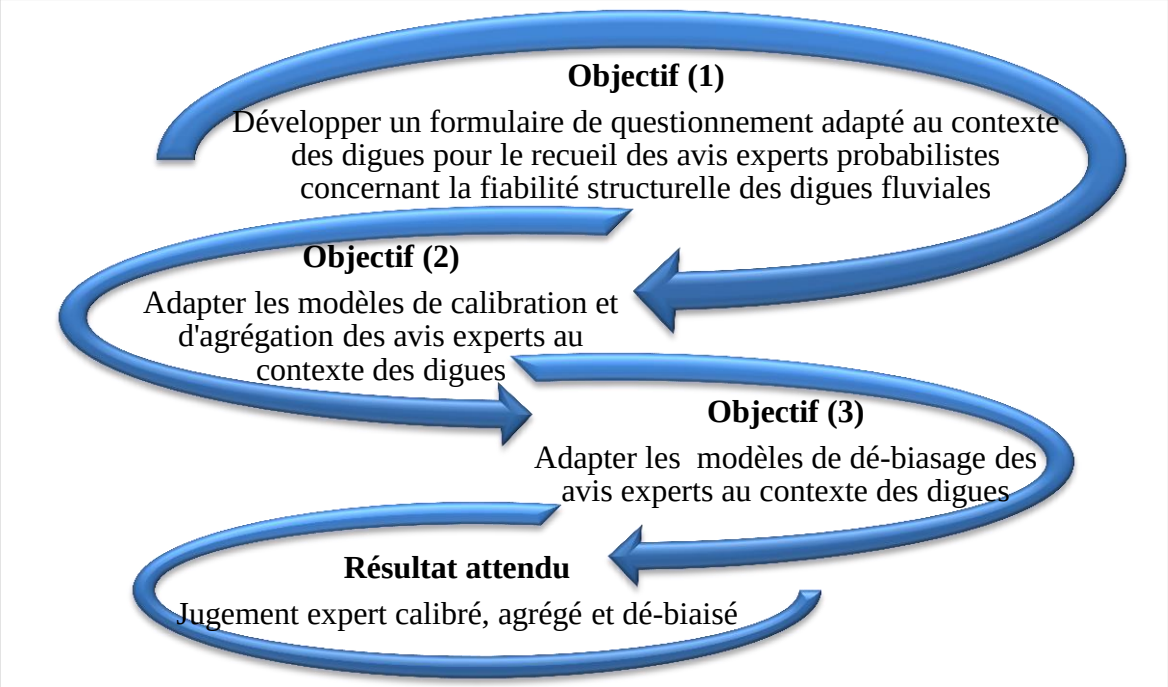


Figure 6-1. Les différents objectifs liés au domaine du génie civil pour l'élaboration d'une démarche complète pour l'évaluation de la fiabilité structurelle des digues à partir du jugement d'expert

Ce chapitre débute par les principes de notre démarche complète proposée pour le traitement du jugement d'expert concernant l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales. Dans la suite, le chapitre traite les différentes propositions d'adaptation des démarches d'élicitation, de calibration, d'agrégation et de dé-biaisage des avis experts au domaine des digues :

1- une adaptation des démarches d'élicitation des avis experts au domaine des digues afin de répondre à la première question scientifique de cette recherche : *comment éliciter et recueillir des évaluations expertes probabilistes dans un contexte incertain* ?
2- une adaptation des démarches de calibration et d'agrégation des avis experts au domaine des digues afin de répondre à la deuxième question scientifique de cette recherche : *comment prendre en compte simultanément les avis probabilistes de plusieurs experts ?*
3- une adaptation des démarches mathématisées de dé-biaisage des avis experts au domaine des digues afin de répondre à la troisième question scientifique : *comment exploiter les évaluations expertes pour identifier et réduire les biais en phase post-élicitation ?*

Chaque adaptation proposée sera illustrée par un exemple détaillé issu du domaine des digues et au final, ce chapitre débouche sur deux propositions de combinaisons des démarches que nous mettons en place pour le traitement et l'exploitation des dires d'experts dans le domaine du génie civil :

- « **EiCAD** » qui consiste à combiner des démarches d'Elicitation individuelles, de Calibration, d'Agrégation puis de Dé-biaisage des avis experts.
- « **EiDA** » qui consiste à combiner des démarches d'Elicitation individuelles, de Dé-biaisage puis d'Agrégation des avis experts.

6.1 Principes de la démarche proposée

Les modèles de traitement mathématique du jugement d'expert concernant la calibration, l'agrégation et le dé-biaisage se basent sur un principe de distinction entre des variables de calibration et des variables d'intérêt. Dans le domaine des digues, l'identification et la détermination de ces deux variables est une étape essentielle pour l'adaptation et la mise en œuvre de modèles d'élicitation, de calibration, d'agrégation et de dé-biaisage des avis experts.

6.1.1 Identification des variables d'intérêt pour les digues

Dans le domaine des digues, les variables d'intérêt correspondent aux indicateurs évaluant la sécurité des digues vis-à-vis des mécanismes de rupture des digues qui ne bénéficient pas d'une définition et d'une caractérisation de l'état-limite permettant le calcul direct d'un facteur de sécurité ou d'une probabilité de défaillance par des approches quantitatives. Pour ces indicateurs évaluateurs, le jugement expert est le seul moyen d'évaluer la fiabilité structurelle d'une digue vis-à-vis les mécanismes de rupture par érosion interne, par affouillement et par surverse. Dès lors nos variables d'intérêt sont donc :

- le mécanisme de rupture de digue par érosion interne ;
- le mécanisme de rupture de digue par affouillement ;
- le mécanisme de rupture de digue par surverse.

Dans cette recherche nous nous intéressons à étudier le mécanisme de rupture par érosion interne. Dès lors, dans la suite nous retenons ce mécanisme de rupture comme variable d'intérêt.

6.1.2 Identification des variables de calibration pour les digues

Dans le domaine des digues, l'identification des variables de calibration crédibles et intuitives pertinentes n'est pas une procédure facile à accomplir. Cependant le mécanisme de rupture par glissement bénéfice d'une définition et d'une caractérisation de l'état-limite permettant le calcul par des approches quantitatives :

1- du facteur de sécurité d'un talus (Fs) qui se calcule par une analyse déterministe ;
2- de la probabilité de défaillance d'un talus (P_f) qui se calcule par une analyse probabiliste.

Dès lors nous avons fait le choix de privilégier le facteur de sécurité et la probabilité de défaillance d'un talus d'une digue comme variables de calibration. Ce choix est lié au fait que ces deux variables présentent des caractéristiques de crédibilité et d'intuitivité :

1- elles sont des variables de calibration *crédibles* car leurs valeurs analytiques se déterminent par des approches quantitatives, à partir des données précises et à l'aide d'un logiciel géotechnique spécifique dont les résultats sont indiscutables ;
2- elles sont des variables de calibration *intuitives* car un expert est capable d'évaluer l'état d'une digue en utilisant un facteur de sécurité ou une probabilité de défaillance.

6.1.3 Caractéristiques des variables de calibration et des variables d'intérêt pour les digues

Dans le Tableau 6-1, nous détaillons les différentes caractéristiques des variables de calibration et des variables d'intérêt choisies pour les digues et sur lesquelles les experts devraient fournir leurs jugements :

Tableau 6-1. Caractéristiques des variables de calibration et des variables d'intérêt pour les digues fluviales

	Variables de calibration	Variables d'intérêt
Notation	VC	VI
Rôle	Variables actives	Variables passives
Vraies valeurs	connues	inconnues
Nature	Facteur de sécurité Probabilité de défaillance	Probabilité de défaillance
Forme	Intervalle d'incertitude Il se compose, respectivement, de trois quantiles probabilistes, $[5\%, 50\%, 95\%]$ - le quantile inférieur (5%) et le quantile supérieur (95%) forment l'intervalle des valeurs probables (selon l'expert) - le quantile (50%) représente la valeur la plus vraisemblable à laquelle l'expert accorde confiance	
Type	- **Variables déterministes** : facteurs de sécurité vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement - **Variables probabilistes** : probabilité de défaillance vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement	- **Variables probabilistes** : Probabilités de défaillance vis-à-vis les mécanismes de rupture par érosion interne, par affouillement et par surverse
Modalité d'obtention	Approche quantitative basée sur *« la théorie de l'équilibre limite »* Calcul réalisable par une analyse numérique à l'aide d'un logiciel de calcul géotechnique.	Jugement expert

6.2 Démarches pour l'élicitation des jugements d'experts

Question scientifique 1/3		
comment éliciter et recueillir des évaluations expertes probabilistes dans un contexte incertain ?		
Objectif	:	Eliciter et recueillir les évaluations expertes données sur plusieurs profils de la digue à évaluer
Outil	:	Formulaire de questionnement
Données d'entrée	:	Profils liés à la digue à évaluer - Profils de digues théoriques - Caractéristiques géométriques - Caractéristiques hydrauliques - Caractéristiques géotechniques - Lois probabilistes des caractéristiques géotechniques
Données de sortie	:	• Facteurs de sécurité au glissement (FS) donnés sous format probabiliste • Probabilité de défaillance au glissement (Pfc) - données sous format probabiliste • Variables de calibration & Variables d'intérêt • Elicitations expertes sur les variables de calibration et les variables d'intérêt sous format probabiliste (intervalle d'incertitude et valeur plus vraisemblable
Mots clés	:	FS – Pfc – quantiles probabilistes – jugement expert – mécanisme de rupture – informations de repérage objectif– intervalle d'incertitude – valeurs plus vraisemblables
Références	:	Vuillet et *al.* (2013) ; Vuillet (2012) ; Koehler et Harvey (2004) ; Soll et Klayman (2003) ; Vick (2000)

L'objectif de l'adaptation de démarches d'élicitation au domaine des digues est de construire un formulaire de questionnement adapté à ce domaine et permettant d'éliciter et de recueillir les avis experts sur des variables de calibration et des variables d'intérêt. Le formulaire doit présenter plusieurs cas d'études aux experts « ouvrages hydrauliques » participant à notre recherche pour avoir leurs évaluations sur la fiabilité structurelle des profils d'ouvrages à évaluer. Les données des évaluations obtenues (les données de sorties) fourniront la matière à l'application des modèles mathématiques pour le traitement des biais experts et correspondent aux variables de calibration et aux variables d'intérêt.

Dans notre domaine de digues fluviales nous proposons d'élaborer un formulaire de questionnement en se basant sur les différentes techniques et stratégies d'élicitation des avis experts proposés par la littérature statistique, économique et psychologique. Nous choisissons d'adopter :

1- La stratégie de groupe de décision proposée par Koehler et Harvey (2004) afin d'avoir plusieurs avis concernant notre problématique de recherche à savoir déterminer la probabilité de défaillance des ouvrages de protection contre les inondations.

Les experts de ce groupe de décision seront interrogés séparément (individuellement) sur un formulaire de questionnement prédéterminé. Ils devraient fournir leurs jugements sous forme de trois quantiles : l'intervalle d'incertitude (borne inférieure et borne supérieure) et puis la valeur la plus vraisemblable. Cette dernière étape correspond aux techniques exigées par Soll et Klayman (2004) proposées pour réduire le biais experts de sur-confiance.

2- La stratégie de décomposition proposée par Vick (2002) afin de décomposer les mécanismes de défaillances des ouvrages de protection contre les inondations en plusieurs fonctionnalités et à diviser l'incertitude sur plusieurs composants et fonctionnalités de la digue à évaluer. Nous utilisons pour cela la démarche de décomposition correspond aux travaux de Serre (2005) et Vuillet (2012) qui ont proposé une décomposition du système « digue » par l'identification des fonctions de chaque composant des ouvrages, ainsi que les causes et les effets de leurs défaillances. Cette décomposition a permis de modéliser les mécanismes de rupture au moyen d'indicateurs de performance (IP), de critères d'évaluation (Ci) et d'indicateurs d'état (IE) qui seront utilisés pour construire notre formulaire de questionnement, notamment pour la variable d'intérêt (le mécanisme de rupture par érosion interne).

6.2.1 Construction du formulaire pour les variables de calibration déterministe « facteur de sécurité (Fs) d'un talus de digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement »

Le formulaire doit contenir plusieurs fiches de questionnement concernant le facteur de sécurité de la digue vis-à-vis de mécanisme de rupture par glissement du talus. Les fiches concernent la digue à évaluer et des profils théoriques (fictifs), de manière à proposer l'évaluation des profils variés. Cela permet d'avoir une variété de profils permettant de solliciter le plus largement possible l'expérience des experts lors de la phase d'élicitation. En termes pratiques, la construction du formulaire de questionnement est basée respectivement sur trois éléments : I) élément de question, II) élément d'information et, III) élément de réponse.

I. Elément de question

Il s'agit de la question sur laquelle nous souhaitons interroger les experts. Il contient une précision sur le talus (aval ou amont) à évaluer et la crue (période de retour 200 ans, 500 ans ou une crue atteignant la crête de la digue) pour laquelle le facteur de sécurité vis-à-vis de mécanisme de rupture par glissement est demandé. Ces questions prennent la forme suivante :

- *Compte tenu de toutes les informations théoriques à disposition, quel est le facteur de sécurité de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement du talus aval qu'on pourrait accorder à ce profil de digue, en cas d'occurrence d'une crue atteignant la crête de digue ?*
- *Compte tenu de toutes les informations théoriques à disposition, quel est le facteur de sécurité de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement du talus aval*

qu'on pourrait accorder à ce profil de digue, en cas d'occurrence d'une crue de période de retour 200 ans ?

- *Compte tenu de toutes les informations théoriques à disposition, quel est le facteur de sécurité de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement du talus aval qu'on pourrait accorder à ce profil de digue, en cas d'occurrence d'une crue de période de retour 500 ans.*

II. Elément d'information

Il s'agit d'une présentation de toutes les données nécessaires aux experts pour formuler leurs réponses et donner leurs jugements. Ces informations correspondent aux *« informations de repérage objectif »* (Soll et Klayman, 2003). Les éléments d'information intégrés dans le formulaire sont les suivants:

- les données géométriques du profil à évaluer ;
- les données hydrauliques concernant la sollicitation hydraulique pour laquelle le facteur de sécurité (FS) du profil est demandé d'être évalué ;
- les données géotechniques des matériaux constitutifs du remblai du corps et de la fondation du profil de digue ;
- les types du revêtement / protection de côté amont et aval du profil à évaluer ;
- la coupe type du profil à évaluer contenant : 1) le niveau d'eau dans la rivière, 2) la ligne piézométrique dans la digue et, 3) la zone concernée par le glissement.

III. Elément de réponse

Il s'agit de la façon dont l'expert communique son jugement. Dans un premier temps, il est demandé à l'expert de déterminer respectivement, par son jugement expert, trois valeurs du facteur de sécurité des digues vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement (FS : quantile 5%, FS : quantile 95%, FS : quantile 50%) et de remplir ses jugements dans chaque fiche des profils (tableau ci-contre). En d'autres termes, l'expert est sollicité tout d'abord pour éliciter son intervalle d'incertitude [quantile 5%, quantile 95%] puis pour préciser la valeur la plus vraisemblable issue de l'intervalle élicité (Soll et Klayman, 2003).

Tableau 6-2. Tableau de recueil de jugement expert sur le facteur de sécurité (FS)

Facteur de sécurité (FS)	FS : quantile 5%	
	FS : quantile 95%	
	FS : Valeur la plus vraisemblable (q50%)	

Par ailleurs, les trois valeurs de facteurs de sécurité (FS) des talus à éliciter par l'expert, doivent correspondre aux considérations suivantes :

1) **Pour « FS : quantile 5% » :** je suis certain à 95% que le facteur de sécurité du talus du profil analysé de la digue est au moins : (FS : quantile 5%)

2) **Pour « FS : quantile 95% » :** je suis certain à 95% que le facteur de sécurité du talus du profil analysé de la digue ne dépasse pas : (FS : quantile 95%)
3) **Pour « FS : quantile 50% » :** je pense que la valeur la plus vraisemblable du facteur de sécurité du talus du profil analysé de la digue correspond à : (FS : quantile 50%)

Plus précisément, les estimations des quantiles 5% et 95% correspondent à un intervalle de valeurs dans lequel se situe l'estimation de la valeur du quantile 50% correspondant à la valeur la plus vraisemblable à laquelle l'expert accorde confiance. L'estimation des quantiles 5% et 95% permet à l'expert d'exprimer ses incertitudes vis à vis de la valeur la plus vraisemblable (quantile 50%)

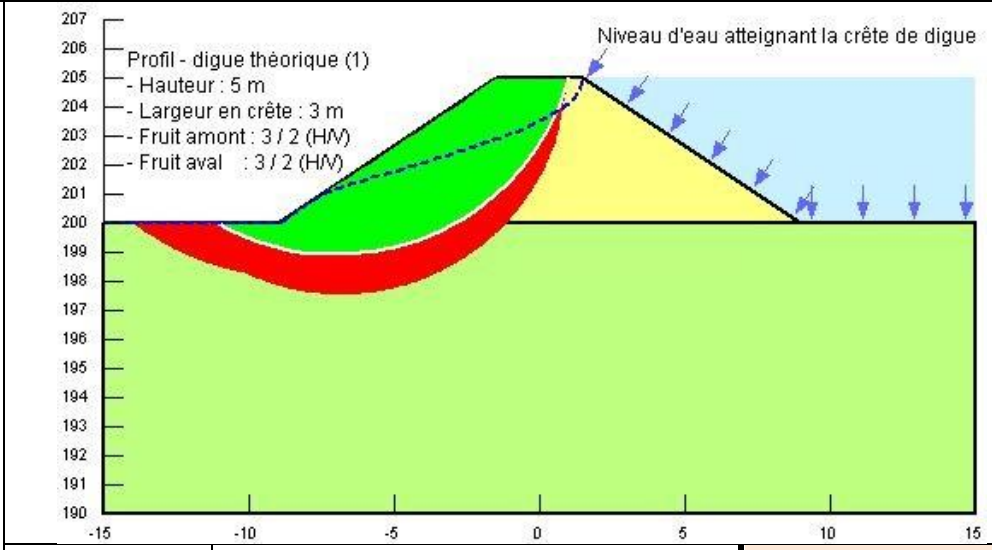
Le Tableau 6-3 présente la forme générale du formulaire de questionnement des variables de calibration sur le facteur de sécurité FS vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement et le

Tableau 6-4 présente l'exemple d'une fiche d'un profil d'une digue issue du formulaire développé dans cette recherche.

Tableau 6-3. Tableau explicatif d'une fiche du formulaire de questionnement concernant les variables de calibration déterministe - Facteur de Sécurité vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement

<table>
<tr><th>Numéro de fiche</th><th colspan="3">Nom du profil</th></tr>
<tr><td colspan="4">Elément de question : La question principale</td></tr>
<tr><td colspan="4">Elément d'information</td></tr>
<tr><td>Données Géométriques</td><td colspan="3">- Hauteur (m)
- Cote en crête par rapport à NGF (m)
- Largeur en crête (m)
- Fruit amont (H/V)
- Fruit aval (H/V)</td></tr>
<tr><td>Données Hydrauliques</td><td colspan="3">- Le niveau d'eau côté rivière et la ligne piézométrique pour la crue considérée
- Le régime selon lequel la ligne piézométrique a été déterminée (régime permanant ou régime transitoire)</td></tr>
<tr><td>Données Géotechniques</td><td colspan="3">Pour les matériaux constitutifs du remblai du corps et de la fondation de digue:
- Poids volumique humide γ_h (kN/m^3)
- Angle de frottement $\emptyset$ (°)
- Cohésion C (kPa)
- Perméabilité K (m/s)</td></tr>
<tr><td>Revêtements protection</td><td colspan="3">- Type du revêtement – protection pour les deux côtés : plaine et cours d'eau</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Valeurs du facteur de sécurité FS à estimer</td><td>Crue : niveau d'eau pour lequel le FS est demandé d'être évalué</td><td colspan="2">Une coupe transversale précisant : 1) le niveau d'eau dans la rivière, 2) la ligne piézométrique dans la digue et, 3) la zone concernée par le glissement.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Elément de réponse</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Facteur de sécurité (FS)</td><td>FS : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

Tableau 6-4. Exemple d'une fiche d'un profil d'une digue issue du formulaire de questionnement développé dans ce travail de recherche – variable de calibration déterministe

<table>
<tr><td>Fiche 01</td><td colspan="3">Profil - Digue Théorique 1</td></tr>
<tr><td colspan="4">Compte tenu de toutes les informations théoriques à disposition, quel est le facteur de sécurité de la digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement du talus aval qu'on pourrait accorder à ce profil de digue, en cas d'occurrence d'une crue atteignant la crête de digue ?</td></tr>
<tr><td>Données Géométriques</td><td colspan="3">- Hauteur = 5 m
- Cote en crête = 205 m NGF
- Largeur en crête = 3 m
- Fruit amont = 3/2 (H/V)
- Fruit aval = 3/2 (H/V)</td></tr>
<tr><td>Données Hydrauliques</td><td colspan="3">- Niveau d'eau amont : crête de la digue = 205 m NGF
- Ligne piézométrique calculée en régime permanent</td></tr>
<tr><td>Données Géotechniques</td><td colspan="2">Matériaux constitutifs du remblai du corps de digue
- Matériaux sable-limoneux
- Perméabilité $K = 10^{-6}\ m/s$
- Poids volumique : $\gamma_h = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
- Angle de frottement : $\emptyset = 20°$
- Cohésion : $c = 15\ kPa$</td><td>Matériaux constitutifs de la fondation de la digue
- Matériaux sable-limoneux
- Perméabilité $K = 10^{-5}\ m/s$
- Poids volumique : $\gamma_h = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
- Angle de frottement : $\emptyset = 25°$
- Cohésion : $c = 10\ kPa$</td></tr>
<tr><td>Revêtements protection</td><td colspan="3">- Côté plaine : Terre végétale
- Côté cours d'eau : Enrochement superficiel</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Valeurs du facteur de sécurité FS à estimer</td><td colspan="3"> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Facteur de sécurité (FS)</td><td>FS : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

6.2.2 Construction du formulaire de questionnement pour les variables de calibration probabiliste « probabilité de défaillance conditionnelle ($\mathbf{P_{fc}}$) d'un talus de digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement »

Le formulaire doit contenir plusieurs fiches de questionnement concernant la probabilité de défaillance conditionnelle de l'ouvrage vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement du talus. Les fiches concernent la digue à évaluer et des profils théoriques (fictifs) de manière à proposer à l'évaluation des profils variés. Cela permet d'avoir une variété des profils permettant de solliciter le plus largement possible l'expérience des experts lors de la phase d'élicitation. En termes pratiques, la construction du formulaire de questionnement est basée respectivement sur trois éléments : I) l'élément de question, II) l'élément d'informations et, III) l'élément de réponse.

I. L'élément de question

Il s'agit de la question sur laquelle nous souhaitons interroger les experts. Il contient une précision sur le talus (aval ou amont) à évaluer et la crue (période de retour 200 ans, 500 ans ou une crue atteignant la crête de la digue) pour laquelle le facteur de sécurité vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement est demandé. Ces questions prennent la forme suivante :

- *Compte tenu de toutes les informations à disposition, quelle est la probabilité P_{fc} que la digue se rompe par glissement du talus aval en cas d'occurrence d'une crue ayant un niveau d'eau atteignant la crête de digue ?* $P_{f-totale} = P_{fc} * P_{crue}$
- *Compte tenu de toutes les informations à disposition, quelle est la probabilité P_{fc} que la digue se rompe par glissement du talus aval en cas d'occurrence d'une crue Q200* $(P_{crue} = 1/200)$*?* $P_{f-totale} = P_{fc} * P_{crue}$
- *Compte tenu de toutes les informations à disposition, quelle est la probabilité P_{fc} que la digue se rompe par glissement du talus aval en cas d'occurrence d'une crue Q500* $(P_{crue} = 1/500)$*?* $P_{f-totale} = P_{fc} * P_{crue}$

II. L'élément d'informations

Il s'agit d'une présentation de toutes les données nécessaires aux experts pour formuler leurs réponses et donner leurs jugements. Ces informations correspondent aux *« informations de repérage objectif »* (Soll et Klayman, 2003). Les éléments d'information intégrés dans le formulaire sont les suivants :

- les données géométriques du profil à évaluer ;
- les données hydrauliques de la sollicitation hydraulique pour laquelle la fiabilité structurelle du profil est demandée d'être évaluée ;
- les données géotechniques des matériaux constitutifs du remblai du corps et de la fondation du profil de digue ;
- la coupe type du profil à évaluer contenant : 1) le niveau d'eau dans la rivière, 2) la ligne piézométrique dans la digue et, 3) la zone concernée par le glissement ;
- les données probabilistes concernant les lois des probabilités des données d'entrées des caractéristiques géotechniques du profil à évaluer ;
- les données issues d'une analyse déterministe qui se présentent par le facteur de sécurité FS de la digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement du talus.

III. L'élément de réponse

Il s'agit de la façon dont l'expert communique son jugement. Dans un premier temps, il est demandé à l'expert de déterminer respectivement, par son jugement expert, trois valeurs de la probabilité conditionnelle de défaillance (P_{fc}) de l'ouvrage vis-à-vis d'un mécanisme de rupture par (P_{fc} : quantile 5%, P_{fc} : quantile 95%, P_{fc} : quantile 50%) et de remplir ses jugements dans chaque fiche des profils (Tableau 6-5). En d'autres termes, l'expert est sollicité tout d'abord pour éliciter son intervalle d'incertitude [quantile 5%, quantile 95%] puis pour préciser la valeur la plus vraisemblable issue de l'intervalle élicité (Soll et Klayman, 2003).

Tableau 6-5. Tableau de recueil de jugement expert sur la probabilité de défaillance(P_{fc})

Probabilité de défaillance (P_{fc})	P_{fc} : quantile 5%	
	P_{fc} : quantile 95%	
	P_{fc} : Valeur la plus vraisemblable (q50%)	

Par ailleurs, les trois valeurs de la probabilité de défaillance de l'ensemble de l'ouvrage à éliciter par l'expert doivent correspondre aux considérations suivantes :

1) **Pour « P_{fc} : quantile 5% » :** je suis certain à 95% que la probabilité de défaillance du profil analysé de la digue est au moins : (P_{fc} : quantile 5%)
2) **Pour « P_{fc} : quantile 95% » :** je suis certain à 95% que la probabilité de défaillance du profil analysé de la digue ne dépasse pas : (P_{fc} : quantile 95%)
3) **Pour « P_{fc} : quantile 50% » :** je pense que la valeur la plus vraisemblable de la probabilité de défaillance du profil analysé de la digue correspond à : (P_{fc} : quantile 50%)

Plus précisément, les estimations des quantiles 5% et 95% correspondent à un intervalle de valeurs dans lequel se situe l'estimation de la valeur du quantile 50% correspondant à la valeur la plus vraisemblable à laquelle l'expert accorde confiance. L'estimation des quantiles 5% et 95% permet à l'expert d'exprimer ses incertitudes vis à vis de la valeur la plus vraisemblable (quantile 50%)

Le Tableau 6-6 présente la forme générale du formulaire de questionnement des variables de calibration sur la probabilité conditionnelle de défaillance P_{fc} vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement et le Tableau 6-7 présente l'exemple d'une fiche type d'un profil d'une digue du formulaire développé dans cette recherche.

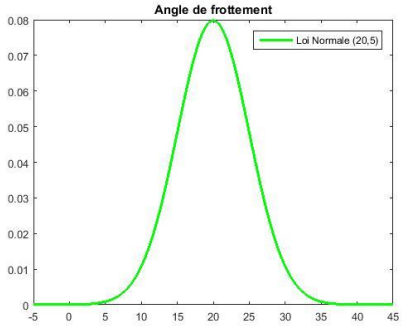
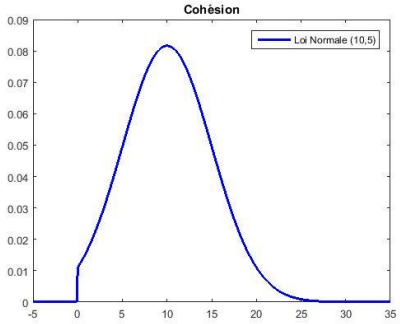
Tableau 6-6. Tableau explicatif d'une fiche du formulaire de questionnement concernant les variables de calibration probabiliste – Probabilité de défaillance vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement

<table>
<tr><td>Numéro de fiche</td><td colspan="3">Nom du profil</td></tr>
<tr><td colspan="4">Elément de question : La question principale</td></tr>
<tr><td colspan="4">Elément d'information</td></tr>
<tr><td>Données Géométriques
Cf. Figure ci-dessous</td><td colspan="3">- Hauteur (m)
- Cote en crête par rapport à NGF (m)
- Largeur en crête (m)
- Fruit amont (H/V)
- Fruit aval (H/V)</td></tr>
<tr><td>Données Hydrauliques</td><td colspan="3">- Le niveau d'eau côté rivière et la ligne piézométrique pour la crue considérée
- Le régime selon lequel la ligne piézométrique a été déterminée (régime permanant ou régime transitoire)</td></tr>
<tr><td>Données Géotechniques</td><td colspan="3">Pour les matériaux constitutifs du remblai du corps et de la fondation de digue:
- Poids volumique humide γ_h (kN/m^3)
- Angle de frottement $\emptyset$ (°)
- Cohésion C (kPa)
- Perméabilité K (m/s)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Lois des probabilités des données d'entrée</td><td colspan="3">Les données probabilistes correspondent aux lois probabilistes des paramètres géotechniques : la cohésion et l'angle du frottement.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Illustration des lois probabilistes utilisées</td></tr>
<tr><td>L'angle de frottement
(corps - fondation)

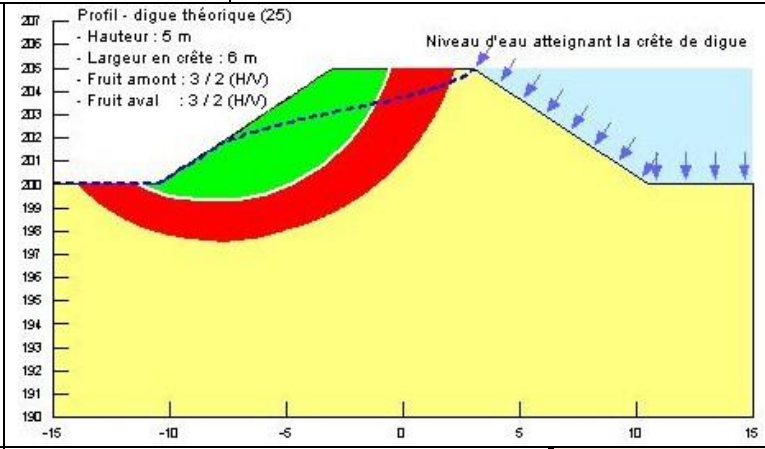
Type de loi probabiliste :
Moyenne : °
Ecart-type : °</td><td colspan="2">La cohésion
(corps - fondation)

Type de loi probabiliste :
Moyenne : kPa
Ecart-type : kPa
Min = 0 kPa</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Analyse déterministe</td><td colspan="3">L'analyse déterministe présente :</td></tr>
<tr><td>La valeur du facteur de sécurité (FS) calculé (avec les valeurs moyennes)</td><td colspan="2">Une coupe transversale précisant : 1) le niveau d'eau dans la rivière, 2) la ligne piézométrique dans la digue et, 3) la zone concernée par le glissement.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Analyse probabiliste</td><td colspan="3">Elément de réponse</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Probabilité de défaillance (P_{fc}) au glissement</td><td>P_{fc} : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc} : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc} : Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

Tableau 6-7. Exemple d'une fiche d'un profil d'une digue issue du formulaire de questionnement développé dans ce travail de recherche – variable de calibration probabiliste

<table>
<tr><td>Fiche 30</td><td colspan="3">Profil – Digue Théorique 25</td></tr>
<tr><td colspan="4">Compte tenu de toutes les informations à disposition, quelle est la probabilité P_{fc} que la digue se rompe par glissement du talus aval en cas d'occurrence d'une crue ayant un niveau d'eau atteignant la crête de digue ?
$P_{f-Total} = P_{fc} * P_{crue}$</td></tr>
<tr><td>Données Géométriques
Cf. Figure ci-dessous</td><td colspan="3">- Hauteur = 5 m
- Côte en crête = 205 m NGF
- Largeur en crête = 6 m
- Fruit amont = 3/2 (H/V)
- Fruit aval = 3/2(H/V)</td></tr>
<tr><td>Données Hydrauliques</td><td colspan="3">- Niveau d'eau de la crue atteignant la crête de la digue
- Ligne piézométrique calculée en régime permanent</td></tr>
<tr><td>Données Géotechniques</td><td colspan="3">Corps et Fondation
- Matériaux sable-limoneux
- Perméabilité $K = 10^{-6}\ m/s$
- Poids volumique : $\gamma_h = 18\ kN/m^3$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Lois des probabilités des données d'entrée</td><td colspan="2"> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">L'angle de frottement
(corps - fondation)

Loi probabiliste : loi normale
Moyenne : 20°
Ecart-type : 5°</td><td>La cohésion
(corps - fondation)

Loi probabiliste : loi normale tronquée à 0
Moyenne : 10 kPa
Ecart-type : 5 kPa
Min = 0 kPa</td></tr>
<tr><td>Analyse déterministe</td><td>FS calculé
(avec les valeurs moyennes)
Talus aval
1,3</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Analyse probabiliste</td><td rowspan="3">Probabilité de défaillance (P_{fc}) au glissement</td><td>P_{fc} : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc} : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc}: Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

6.2.3 Construction du formulaire de questionnement pour les variables d'intérêt probabiliste « probabilité de défaillance d'une digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne »

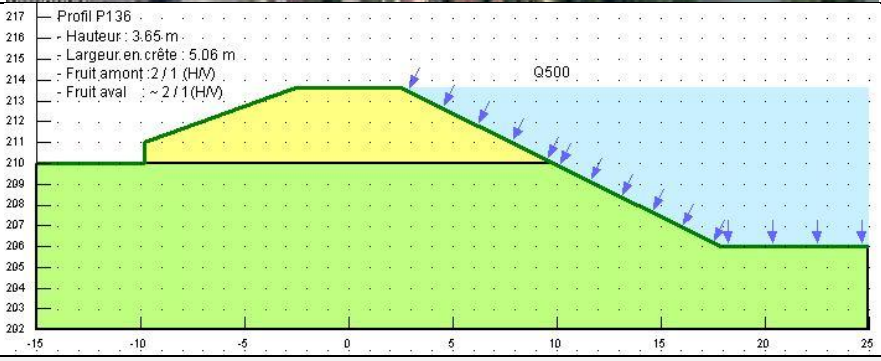
La construction du formulaire pour les trois mécanismes de rupture repose sur les trois mêmes éléments des précédents formulaires: I) l'élément de question, II) l'élément d'information et, III) l'élément de réponse. La différence se présente au niveau de l'élément d'information qui comprend une succession de critères (éléments) à évaluer pour prendre en compte la défaillance de la digue en question (Vick, 2002). La succession des critères (éléments) repose sur les travaux de Serre (2005) et Vuillet (2012) qui ont proposé une décomposition du système « digue » par l'identification des fonctions de chaque composant des ouvrages, ainsi que les causes et les effets de leurs défaillances. L'objectif est de présenter aux experts une fiche de questionnement comprenant tous les critères d'évaluation (Ci) et les données nécessaires pour fournir leurs élicitations.

Le Tableau 6-8 présente la forme générale du formulaire de questionnement des variables d'intérêt probabilistes vis-à-vis du mécanisme de rupture par l'érosion interne, l'affouillement et la surverse et le Tableau 6-9 présente l'exemple d'une fiche type d'un profil de digue du formulaire développé dans cette recherche.

Tableau 6-8. Tableau explicatif d'une fiche du formulaire de questionnement concernant les variables d'intérêt probabiliste – Probabilité de défaillance vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne, affouillement et surverse

<table>
<tr><td colspan="2">Numéro de fiche</td><td colspan="3">Nom du profil</td></tr>
<tr><td colspan="5">Elément de question : La question principale</td></tr>
<tr><td colspan="5">Elément d'information</td></tr>
<tr><td>Vue aérienne du tronçon</td><td colspan="4">Photo aérienne de l'ensemble du tronçon</td></tr>
<tr><td>Coupe type</td><td colspan="4">La coupe type du profil présente les données géométriques du profil</td></tr>
<tr><td colspan="5">Elément d'information : Critères d'évaluation présentant des données techniques recenssées sur l'ensemble du tronçon</td></tr>
<tr><td>$C_{1,EI,EX,SU}$</td><td colspan="4" rowspan="3">- Les données liées à chaque critère d'évaluation :
Critère 1
Critère 2
…</td></tr>
<tr><td>$C_{2,EI,EX,SU}$</td></tr>
<tr><td>$C_{3,EI,EX,Su}$</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Analyse probabiliste</td><td colspan="4">Elément de réponse</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Probabilité de défaillance (P_{fc}) à l'Erosion Interne</td><td>P_{fc} : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc} : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc} : Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

Tableau 6-9. Exemple d'une fiche d'un profil d'une digue issue du formulaire de questionnement développé dans ce travail de recherche – variable d'intérêt probabiliste (fiche concerne la digue du Drac rive gauche)

<table>
<tr><td>Fiche 60</td><td colspan="3">Tronçon 3 : Profil P 136</td></tr>
<tr><td colspan="4">Compte tenu de toutes les informations à disposition, quelle est la probabilité P_{fc} que la digue se rompe par érosion interne en cas d'occurrence d'une crue Q500 ($P_{crue} = 1/500$) ?
$P_{f-Total} = P_{fc} * P_{crue}$</td></tr>
<tr><td>Vue aérienne du tronçon</td><td colspan="3">
</td></tr>
<tr><td>Coupe type</td><td colspan="3"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="4">Critères d'évaluation présentant des données techniques recenssées sur l'ensemble du tronçon</td></tr>
<tr><td>$C_{1,EI}$
Perméabilité du corps de digue</td><td colspan="3">- Perméabilité du corps : $K = 10^{-3}\ m/s$
- Perméabilité de la fondation : $K = 5 * 10^{-7}\ m/s$
- Géométrie du profil : hauteur d'endiguement est de 3,65 m – largeur en crête 5,06 m – fruit aval ~2H/1V – fruit amont 2H/1V - l'eau est au-dessus de la crête de 1 cm pour une crue Q500
- Fuites : non détectées
- Etanchéité de la protection amont : Perré recouvert de terre végétale</td></tr>
<tr><td>$C_{2,EI}$
Résistance du corps de digue à l'érosion interne</td><td colspan="3">- Matériaux constitutifs du remblai corps de la digue : sablo-graveleux, semblent localement peu compact.
- Matériaux constitutifs de la fondation de la digue : sablo-graveleux, semblent présenter des lentilles de matériaux plus ou moins compacts.
- Cohésion du corps et de la fondation $c = 0\ kPa$
- Angle de frottement du corps de la digue Ø=35°
- Angle de frottement de la fondation de la digue Ø=32°
- Discontinuités du remblai : non identifiées par l'observation d'un géotechnicien in situ
- Le gradient hydraulique critique des matériaux est de $i_{cr} = 0{,}4$
- Le gradient hydraulique global de ce profil (P 136) est de $i_{glob} = 0{,}24$ (régime permanent)
- La durée des crues 2 jours</td></tr>
<tr><td>$C_{3,EI}$
Singularités dans le corps de la digue</td><td colspan="3">- Arbres et racines : présence importante d'arbres sur tout le linéaire de la digue côté talus rivière.
- Terriers : pas de terriers importants détectés.
- Ouvrages traversant : pas d'ouvrages traversant identifiés par le gestionnaire de la digue.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Analyse probabiliste</td><td rowspan="3">Probabilité de défaillance (P_{fc}) à l'Erosion Interne</td><td>P_{fc} : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc} : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc} : Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

6.2.4 Exemple d'application au domaine des digues

Supposons un panel d'experts contenant trois experts. L'objectif est de questionner les trois experts sur quatre variables de calibration pour une occurrence de crue atteignant la crête de digue : Précisément, deux variables de calibration déterministes correspondant au facteur de sécurité d'un profil d'une digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement et deux variables de calibration probabilistes correspondant à la probabilité de défaillance d'un profil d'une digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement.

Nous demandons donc à chaque expert du panel de déterminer dans un premier temps, l'intervalle d'incertitude correspondant aux quantiles $[5\%, 95\%]$, puis dans un deuxième temps de déterminer la valeur la plus vraisemblable correspondant au quantile 50%. Cela implique que l'expert réponde, pour les variables de calibration déterministes, de la manière suivante :

1. *Je suis certain à 95% que le facteur de sécurité du talus du profil analysé de la digue est au moins X ;*
2. *Je suis certain à 95% que le facteur de sécurité du talus du profil analysé de la digue ne dépasse pas XX ;*
3. *Je pense que la valeur la plus vraisemblable du facteur de sécurité du talus du profil analysé de la digue correspond à XXX .*

Dans le même ordre d'idée, l'expert répond, pour les variables de calibration probabilistes, de la manière suivante :

1. *Je suis certain à 95% que la probabilité de défaillance de ce profil de digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement est au moins* 10^{-y} *;*
2. *Je suis certain à 95% que la probabilité de défaillance de ce profil de digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement ne dépasse pas* 10^{-yy} *;*
3. *Je pense que la valeur la plus vraisemblable de la probabilité de défaillance de ce profil de digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement correspond à* 10^{-yyy}

Le Tableau 6-10 illustre les réponses de chaque expert du panel pour les quatre variables de calibration déterministes et probabilistes.

Tableau 6-10. Elicitations du panel d'experts données sur les variables de calibration déterministes et probabilistes

Expert	***Expert 1***			***Expert 2***			***Expert 3***		
Quantiles	*5%*	*50%*	*95%*	*5%*	*50%*	*95%*	*5%*	*50%*	*95%*
Variable 1	*1.2*	*1.5*	*1.8*	*1.1*	*1.2*	*1.3*	*0.9*	*1.1*	*1.2*
Variable 2	*1*	*1.2*	*1.3*	*0.8*	*1*	*1.2*	*1.4*	*1.5*	*1.75*
Variable 3	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}	$5*10^{-2}$	$1.5*10^{-1}$	$2*10^{-1}$	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Variable 4	10^{-6}	10^{-5}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	$1.5*10^{-1}$	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}

Nous disposons maintenant des élicitions expertes sous forme d'une distribution probabiliste pour toutes les variables de calibration et également par la modélisation de ces profils à l'aide d'un logiciel de calcul géotechnique nous avons déterminé quantitativement les valeurs de ces variables de calibration (considérées comme « vraie valeur » ou « valeur connue »), comme présenté dans le Tableau 6-11:

Tableau 6-11. Les vraies valeurs (valeurs connues) des variables de calibration calculées par une analyse analytique

Variable de calibration	***Vraie valeur issue d'une analyse quantitative***
Variable 1	*1.623*
Variable 2	*1.121*
Variable 3	$2.7*10^{-3}$
Variable 4	$7.3*10^{-3}$

6.3 Démarches pour la calibration et l'agrégation des jugements d'experts

Question scientifique 2/3		
Comment prendre en compte simultanément les avis probabilistes de plusieurs experts ?		
Calibration des avis experts		
Objectif	:	Pondérer les avis experts par la détermination d'un poids de calibration pour chaque expert.
Outil	:	Modèle mathématique de calibration des avis experts : le modèle de calibration classique de Cooke (1991)
Données d'entrée	:	• Elicitations expertes sur les variables de calibration et les variables d'intérêt sous format probabiliste (intervalle d'incertitude et valeur la plus vraisemblable)
Données de sortie	:	Poids de calibration pour chaque expert
Mots clés	:	Score de calibration - score d'entropie - poids de calibration – précision de l'avis expert - justesse de l'avis expert
Références	:	Cooke (1991)
Agrégation des avis experts		
Objectif	:	Agréger tous les avis experts pondérés
Outille	:	Protocole d'agrégation par la moyenne des quantiles proposé par Lichtendahl et al. (2013)
Données d'entrées	:	Poids de calibration pour chaque expert
Données de sorties	:	• Une seule distribution relative aux variables de calibration calibrées et agrégées sous format probabiliste (intervalle d'incertitude et valeur la plus vraisemblable) • Une seule distribution relative aux variables d'intérêt calibrées et agrégées sous format probabiliste (intervalle d'incertitude et valeur la plus vraisemblable)
Mots clés	:	poids de calibration - moyenne des quantiles - agrégation
Références	:	Lichtendahl et *al.* (2013)

L'objectif de l'adaptation de démarches de calibration et d'agrégation des avis experts au domaine est de permettre de pondérer les avis experts donnés sous format probabiliste. Il s'agit de réaliser une évaluation numérique de la justesse et de la précision des élicitations expertes en se servant des variables de calibration dont les vraies valeurs sont connues. Les résultats de cette phase consistent en des poids de calibration associé à chaque expert du

panel. Ces poids permettent de caractériser les experts en tant que sources d'information et de pondérer leurs avis en vue de les agréger en un seul avis dans une étape d'agrégation des avis experts. Ainsi, le poids de calibration déterminé pour chaque expert permettra de pondérer les avis experts donnés sur des variables dont les vraies valeurs sont inconnues (variables d'intérêt) afin de les agréger en un seul avis.

Pour l'adaptation et la mise en œuvre de cette étape de calibration et d'agrégation, nous proposons d'adopter :

1- le modèle de calibration classique de Cooke (1991) dans le but de caractériser les experts en tant que sources d'informations et d'accorder à leurs avis un poids après avoir évalué mathématiquement la justesse et la précision de leurs jugements ;
2- le modèle proposé par Lichtendahl et *al*. (2013) dans le but d'agréger les avis expert calibrés afin de construire une seule distribution probabiliste sous format probabiliste (intervalle d'incertitude et valeur plus vraisemblable).

6.3.1 Exemple d'application au domaine des digues

Nous poursuivons ici l'exemple donné dans la phase d'élicitation (§6.2.4), le premier objectif est de calculer pour chaque expert du panel un poids de calibration en utilisant les quatre variables de calibration (2 variables déterministes et 2 variables probabilistes) dont les vraies valeurs sont connues.

En effet, la mise en œuvre du modèle de calibration des avis experts de Cooke (1991) est basée sur le calcul des deux scores : score de calibration et score d'entropie. Le calcul de ces deux scores est basé sur un vecteur de probabilité théorique (p_i), un vecteur de probabilité subjective (s_i), et un vecteur de calibration (c_i) qui sont normalisés lors de sa détermination. La normalisation se réalise par rapport aux quantiles (q0) ayant une probabilité de 0% et le quantile (q100%) ayant une probabilité de 100%. De manière approchée, ces derniers se déterminent respectivement, en ajoutant et en enlevant 5% du plus petit intervalle contenant toutes les prédictions des experts du panel (Cooke, 1991).

En outre, la normalisation des élicitations expertes pour des valeurs proche de 0 (comme des probabilités faible de défaillance) se réalise par rapport à une échelle logarithmique (Cooke, 1991). Pour cela nous devons représenter les élicitations expertes probabilistes sur une échelle logarithmique puis nous procédons au calcul des quantiles (q0) et le quantile (q100%) puis nous déterminons le vecteur de probabilité subjective (s_i).

Le Tableau 6-12 présente les élicitations expertes avec le quantile (q0) et le quantile (q100%) (déterminés selon les formules ci-dessous) et la représentation des élicitations expertes probabilistes selon une échelle logarithmique :

$$q_{0=}\min(\text{élicitations panel d'experts})-5\%\,[\min(\text{élicitations panel d'experts})-\max(\text{élicitations panel d'experts})]$$

$$q_{100=}\max(\text{élicitations panel d'experts})+5\%\,[\min(\text{élicitations panel d'experts})-\max(\text{élicitations panel d'experts})]$$

Tableau 6-12. Détermination *du quantile* (q0) et du quantile (q100%)

		Expert 1			Expert 2			Expert 3			
Quantiles	**0%**	**5%**	**50%**	**95%**	**5%**	**50%**	**95%**	**5%**	**50%**	**95%**	**100%**
VC 1	0.86	1.2	1.5	1.8	1.1	1.2	1.3	0.9	1.1	1.2	1.85
VC 2	0.75	1	1.2	1.3	0.8	1	1.2	1.4	1.5	1.75	1.8
VC 3	-6.27	-6	-4	-3	-1	-0.8	-0.7	-3	-2	-1	0.43
VC 4	-6.26	-6	-5	-3	-2	-1	-0.8	-5	-4	-3	-0.57

Le Tableau 6-13 présente les résultats de chaque étape d'application du modèle de Cooke (1991). La première étape vise à déterminer le vecteur de probabilité théorique p_i puis, la deuxième étape vise à déterminer le vecteur de probabilité subjective s_i ce qui permet de calculer le score d'entropie K_e puis, la troisième étape vise à déterminer le vecteur de calibration c_i ce qui permet de calculer le score de calibration C_e. A la fin de ces trois étapes nous pouvons calculer le poids de calibration relatif à chaque expert.

Tableau 6-13. Calcul du poids de calibration par le calcul de vecteur de probabilité théorique p_i, vecteur de probabilité subjective s_i et la composante d'entropie K_e, vecteur de calibration c_i et la composante de calibration C_e

	Expert 1				Expert 2				Expert 3			
1ère Etape : déterminer le vecteur de probabilité théorique p_t												
	5%	45%	45%	5%	5%	45%	45%	5%	5%	45%	45%	5%
2ème Etape : déterminer le vecteur de probabilité subjective s_t												
V1	0.35	0.3	0.3	0.05	0.25	0.1	0.1	0.55	0.05	0.2	0.1	0.65
V2	0.24	0.19	0.1	0.48	0.05	0.19	0.19	0.57	0.62	0.1	0.24	0.05
V3	0.05	0.34	0.17	0.44	0.85	0.08	0.02	0.05	0.56	0.17	0.17	0.10
V4	0.05	0.18	0.35	0.43	0.75	0.18	0.03	0.05	0.22	0.18	0.18	0.43
K_e	0.51				1.32				0.79			
3ème Etape : déterminer le vecteur de calibration c_i												
V1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
V2	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
V3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
V4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
c_e	0.08				0.01				0.01			
Poids de calibration												

	Expert 1	Expert 2	Expert 3
w'_e	0.51*0.08 = 0.04	1.32*0.01 = 0.013	0.79*0.01 = 0.008
	$\sum_{1}^{3} w'_e = 0.04 + 0.013 + 0.008 = 0.061$		
w_e	$w_1 = \frac{0.04}{0.061} \approx 0.64$	$w_2 = \frac{0.013}{0.061} \approx 0.23$	$w_3 = \frac{0.008}{0.061} \approx 0.13$

Discussion sur le résultat du score de calibration

Le score de calibration est détermine par le complément d'une probabilité d'erreur qui se calcule elle-même par le test statistique ki2 (test d'interdépendance).

Le test ki2 permet d'évaluer si une interdépendance existe entre deux distributions. Il permet de comparer une distribution observée (dans notre cas la distribution donnée par l'expert) à une distribution théorique (dans notre cas la distribution probabiliste théorique). En d'autres termes, notre objectif est de calculer une probabilité d'erreur quand la vraie valeur ne se situe pas à l'intérieur de la distribution observée (distribution donnée par l'expert). Moins les vraies valeurs ne se situent à l'intérieur de la distribution observée (distribution données par le expert) plus la probabilité d'erreur est élevée et par conséquent le score de calibration est faible.

Dans notre exemple l'avis de l'expert (1) a eu le meilleur score de calibration($C_1 = 0.08$). Cela signifie que la probabilité d'erreur était faible et que la majorité des vraies valeurs se situe dans son intervalle d'incertitude. Dans le même ordre d'idée, l'avis de l'expert (2) et de l'expert (3) a eu un score de calibration faible ($C_3 = 0.01$). Cela signifie que la probabilité d'erreur était élevée et la majorité des vraies valeurs se situe hors de l'intervalle d'incertitude donné par l'expert (2) et l'expert (3). Comme suite à ces premiers résultats nous pouvons classer préliminairement selon le score de calibration les avis experts par l'ordre suivant :

- le meilleur avis expert selon le score de calibration est l'avis de l'expert (1) ;
- puis l'avis de l'expert (2) et l'expert (3).

Discussion sur le résultat du score d'entropie

L'idée principale de ce score est basée sur la somme de plusieurs petites distances déterminées par la notion statistique « l'information relative ». Elle permet de calculer les distances entre le vecteur de probabilité théorique p_i et le vecteur de probabilité subjective s_i (issu des élicitation expertes). Ce dernier contient les probabilités subjectives que l'expert assigne, implicitement, à chaque intervalle interquantile lors de l'élicitation de son estimation de la variable la plus vraisemblable et son intervalle d'incertitude.

Effectivement dans un cas idéal plus l'intervalle d'incertitude élicité par l'expert est précis et contient la vraie la vraie valeur de la variable de calibration plus l'avis de l'expert aura un meilleur score d'entropie et un meilleur score de calibration et par conséquent un meilleur

poids de calibration. Ce cas idéal est relativement difficile à atteindre dans un contexte réel vu la présence des incertitudes sur les données d'entrées conduisant l'expert à élargir son intervalle d'incertitude pour qu'il contienne la vraie valeur. En d'autres termes, nous pouvons dire qu'avec un intervalle d'incertitude étroit qui ne contient pas la vraie valeur de la variable de calibration on gagne en score d'entropie et on perd en score de calibration et vice-versa.

Dans notre exemple nous remarquons que l'expert (2) a eu le meilleur score d'entropie ($K_2 = 1.32$). Cela signifie que ses intervalles d'incertitude sont étroits (précis) sur l'ensemble des variables de calibration. Dans le même ordre d'idée l'expert (3) a eu un score d'entropie modéré ($K_3 = 0.79$) puis l'expert (1) a eu un le plus faible score d'entropie ($K_1 = 0.51$). Cela signifie que les intervalles d'incertitude sont larges (ils ne sont pas précis) sur l'ensemble des variables de calibration de l'expert (1). Comme suite à ces premiers résultats nous pouvons classer préliminairement selon le score d'entropie les avis expert par l'ordre suivant :

- le meilleur avis expert selon le score d'entropie est l'avis de l'expert (2) ;
- puis l'avis de l'expert (3) ;
- puis l'avis de l'expert (1).

Discussion sur le résultat du poids de calibration

Nous remarquons que le meilleur poids de calibration est celui de l'expert (1) qui a eu un poids de ($w_1 = 0.64$) et qui a eu déjà le meilleur score de calibration, puis l'expert (2) qui a eu un poids de ($w_2 = 0.23$) qui a eu un score de calibration faible, puis l'expert (3) qui a eu un poids de ($w_3 = 0.13$) et qui a eu aussi un score de calibration faible. Nous remarquons que le score de calibration influence le résultat final du poids de calibration. Dès lors le meilleur avis expert est celui de l'expert (1) puis celui de l'expert (2) puis celui de l'expert (3).

Une fois que le poids de calibration w_e de chaque expert est déterminé, nous poursuivons le traitement des élicitations expertes par l'agrégation des élicitations calibrées par l'application du protocole de Lichtendahl et al. (2013). Nous appliquons ce protocole d'agrégation en utilisant les poids de calibration identifiés par la phase de calibration des avis expert. Cela signifie mathématiquement que pour chaque variable de calibration toutes les élicitations de chaque avis expert du panel seront pondérées puis seront agrégées.

Les quatre tableaux ci-dessous illustrent respectivement les résultats d'agrégation effectuée sur chaque variable de calibration dont les valeurs sont pondérées par le poids de calibration relatif à chaque expert.

Tableau 6-14. Distribution agrégée à partir des valeurs calibrées de la variable de calibration (1)

1ère variable de calibration calibrée et agrégée (FS)			
Quantile	5%	50%	95%
$w_1 *$ Expert 1	0.64*1.2	0.64*1.5	0.64*1.8
	$=7.7*10^{-1}$	$=9.6*10^{-1}$	=1.2
$w_2 *$ Expert 2	0.23*1.1	0.23*1.2	0.23*1.3
	$=2.5*10^{-1}$	$=2.7*10^{-1}$	=2.9
$w_3 *$ Expert 3	0.13*0.9	0.13*1.1	0.13*1.2
	$=1.2*10^{-1}$	$=1.5*10^{-1}$	$=1.6*10^{-1}$
$\sum_1^3 w_n * Expert_n$	1.02	1.23	1.44

Tableau 6-15. Distribution agrégée à partir des valeurs calibrées de la variable de calibration (2)

2ème variable de calibration calibrée et agrégée (FS)			
Quantile	5%	50%	95%
$w_1 *$ Expert 1	0.64*1	0.64*1.2	0.64*1.3
	$=6.410^{-1}$	$=7.710^{-1}$	$=8.3*10^{-1}$
$w_2 * Expert\,2$	0.23*0.8	0.23*1	0.23*1.2
	$=1.810^{-1}$	$=2.310^{-1}$	$=2.7*10^{-1}$
$w_3 *$ Expert 3	0.13*1.4	0.13*1.5	0.13*1.75
	$=1.910^{-1}$	$=210^{-1}$	$=2.4*10^{-1}$
$\sum_1^3 w_n * Expert_n$	$8.2*10^{-1}$	$9.93*10^{-1}$	1.1

Tableau 6-16. Distribution agrégée à partir des valeurs calibrées de la variable de calibration (3)

3ème variable de calibration calibrée et agrégée (p_{fc})			
Quantile	5%	50%	95%
$w_1 *$ Expert 1	$10^{0.64*\log(10^{-6})}$	$10^{0.64*\log(10^{-4})}$	$10^{0.64*\log(10^{-3})}$
	$=1.5*10^{-4}$	$=2.8*10^{-3}$	$=1.2*10^{-2}$
$w_2 *$ Expert 2	$10^{0.23*\log(5*10^{-2})}$	$10^{0.23*\log(1.5*10^{-1})}$	$10^{0.23*\log(2*10^{-1})}$
	$=5.1*10^{-1}$	$=6.5*10^{-1}$	$=6.9*10^{-1}$
$w_3 *$ Expert 3	$10^{0.13*\log(10^{-3})}$	$10^{0.13*\log(10^{-2})}$	$10^{0.13*\log(10^{-1})}$
	$=3.9*10^{-1}$	$=5.4*10^{-1}$	$=7.3*10^{-1}$
$\sum_1^3 w_n * Expert_n$	$7.4*10^{-5}$	$1.8*10^{-3}$	$8.4*10^{-3}$

Tableau 6-17. Distribution agrégée à partir des valeurs calibrées de la variable de calibration (4)

4ème variable de calibration calibrée et agrégée (p_{fc})			
Quantile	5%	50%	95%
$w_1 *$ Expert 1	$10^{0.64*\log(10^{-6})}$	$10^{0.64*\log(10^{-5})}$	$10^{0.64*\log(10^{-3})}$
	$=1.5*10^{-4}$	$=6.4*10^{-4}$	$=1.2*10^{-2}$
$w_2 *$ Expert 2	$10^{0.23*\log(10^{-2})}$	$10^{0.23*\log(10^{-1})}$	$10^{0.23*\log(1.5*10^{-1})}$
	$=3.5*10^{-1}$	$=5.9*10^{-1}$	$=6.5*10^{-1}$
$w_3 *$ Expert 3	$10^{0.13*\log(10^{-5})}$	$10^{0.13*\log(10^{-4})}$	$10^{0.13*\log(10^{-3})}$
	$=2.1*10^{-1}$	$=2.9*10^{-1}$	$=3.9*10^{-1}$
$\sum_{1}^{3} w_n * Expert_n$	$5.2*10^{-5}$	$3.8*10^{-4}$	$7.9*10^{-3}$

6.4 Démarches pour le dé-biaisage des jugements d'experts

Question scientifique 3/3		
Comment exploiter les évaluations expertes pour identifier et réduire les biais suite à la phase d'élicitation ?		
Objectif	:	Traitement mathématique du biais de sur-confiance ou sous-confiance. Dé-biaiser les avis experts bruts ou pondérés et agrégés
Outil	:	Principes du modèle de dé-biaissage mathématique de Clemen et Lichtendahl (2002)
Données d'entrée	:	• Une seule distribution relative aux variables de calibration calibrées et agrégées sous format probabiliste (intervalle d'incertitude et valeur la plus vraisemblable) • Une seule distribution relative aux variables d'intérêt calibrées et agrégées sous format probabiliste (intervalle d'incertitude et valeur la plus vraisemblable)
Données de sortie	:	• Facteur d'inflation pour chaque quantile probabiliste. • Une seule distribution relative aux variables de calibration calibrées, agrégées et dé-biaisées sous format probabiliste (intervalle d'incertitude et valeur la plus vraisemblable) • Une seule distribution relative aux variables d'intérêt calibrées, agrégées et dé-biaisées sous format probabiliste (intervalle d'incertitude et valeur la plus vraisemblable)
Mots clés	:	Variable de calibration – facteurs d'inflation (facteurs de correction)
Références	:	Clemen et Lichtendahl (2002)

L'objectif ici est de proposer l'adaptation d'une démarche de dé-biaisage pertinente pour le domaine des digues. Il s'agit de proposer un traitement quantitatif des avis experts donnés sur des variables de calibration et d'identifier par comparaison des éventuelles tendances de l'expert à la sur-confiance ou à la sous-confiance. Pour l'adaptation et la mise en œuvre de la phase de dé-biaisage au domaine des digues, nous proposons d'adopter :

1- le concept mathématique proposé par Clemen et Lichtendahl (2002) concernant la correction des valeurs biaisées en utilisant des coefficients de correction ;
2- un protocole simplifié par calcul itératif pour calculer les coefficients de correction au lieu du protocole bayésien de calcul utilisé proposé par Clemen et Lichtendahl (2002).

6.4.1 Mise en œuvre du modèle de dé-biaisage par calcul itératif

Pour la phase de détermination des facteurs de correction, nous proposons une démarche simplifiée différente de celle proposée par Clemen et Lichtendahl (2002) qui consiste en une

évaluation par calcul itératif. Il s'agit d'adopter la même hypothèse que le modèle de Cooke (1991) prévoyant que la distribution à l'intérieur des intervalles interquantiles est une distribution uniforme et se présente respectivement par les quantiles probabilistes 5%, 50% 95%. Cela permet de déterminer la probabilité des intervalles interquantiles ayant respectivement les valeurs 5%, 45%, 45%, 5%. Connaissant les probabilités des intervalles interquartiles que l'on souhaite atteindre, nous cherchons par plusieurs itérations les coefficients de correction qui permettent de corriger l'intervalle d'incertitude et qui permettent d'obtenir les probabilités des intervalles interquantiles correspondant à l'hypothèse de base.

Une estimation probabiliste à dires d'experts (basée sur le principe du modèle de Cooke (1991)) est dite bonne lorsque les valeurs connues (de la variable de calibration) se trouvent respectivement :

- dans son 1er intervalle interquantile [0%, 5%] dans 5% des cas $\left(\frac{5\%-0\%}{100\%-0\%} = 5\%\right)$
- dans son 2ème intervalle interquantile [5%, 50%] dans 45% des cas $\left(\frac{50\%-5\%}{100\%-0\%} = 45\%\right)$
- dans son 3ème intervalle interquantile [50%, 95%] dans 45% des cas $\left(\frac{95\%-50\%}{100\%-0\%} = 45\%\right)$
- dans son 4ère intervalle interquantile [95%, 100%] dans 5% des cas $\left(\frac{100\%-95\%}{100\%-0\%} = 5\%\right)$

Dès lors, l'objectif de la phase de dé-biaisage est de trouver des coefficients de correction permettant d'apporter une correction aux élicitations des avis experts (calibrées et agrégées ou brutes) dont les probabilités des intervalles interquantile devraient correspondre respectivement à 5%, 45% ; 45% et 5%.

L'organigramme ci-contre illustre l'application développée par calcul itératif du protocole simplifié qui est basée sur les principes mathématiques du modèle de Clemen et Lichtendahl (2002) :

1. Début du traitement
2. Donner une valeur arbitraire au coefficient de correction β
3. Calculer les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés $[L_i^*, R_i^*, U_i^*]$ en utilisant les formules proposées par le modèle de Clemen et Lichtendahl (2002) :

$$L_i^* = (\beta - \alpha_L)R_i + \alpha_L L_i$$

$$R_i^* = \beta\, R_i$$

$$U_i^* = (\beta - \alpha_U)R_i + \alpha_U U_i$$

4. Evaluer le résultat en fonction de la répartition des vraies valeurs dans les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés :

   Cas 1 (oui) : la répartition des vraies valeurs dans les nouveaux intervalles d'incertitude correspond à 50% dans l'intervalle [0%, 50%] et [50%, 100%]. Passer à l'étape suivante.

Cas 2 (Non) : refuser le résultat et répéter l'étape 2 précédente. En d'autres termes itérer la procédure jusqu'à obtenir une répartition des vraies valeurs de 50% de chaque côté du quantile central q50%.

5. Donner une valeur arbitraire au coefficient de correction α_L
6. Calculer les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés $[L_i^*, R_i^*, U_i^*]$ en utilisant les formules proposées par le modèle de Clemen et Lichtendahl (2002) :

$$L_i^* = (\beta - \alpha_L)R_i + \alpha_L L_i$$
$$R_i^* = \beta\, R_i$$
$$U_i^* = (\beta - \alpha_U)R_i + \alpha_U U_i$$

7. Evaluer le résultat en fonction de la répartition des vraies valeurs dans les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés [0%, 5%] :

Cas 1 (oui) : la répartition des vraies valeurs dans les nouveaux intervalles d'incertitude correspond à 5% dans l'intervalle [0%, 5%]. Passer à l'étape suivante.

Cas 2 (Non) : refuser le résultat et répéter l'étape 5 précédente. En d'autres termes itérer la procédure jusqu'à obtenir une répartition des vraies valeurs de 5% inférieure au quantile minimal q5%.

8. Donner une valeur arbitraire au coefficient de correction α_U
9. Calculer les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés $[L_i^*, R_i^*, U_i^*]$ en utilisant les formules proposées par le modèle de Clemen et Lichtendahl (2002) :

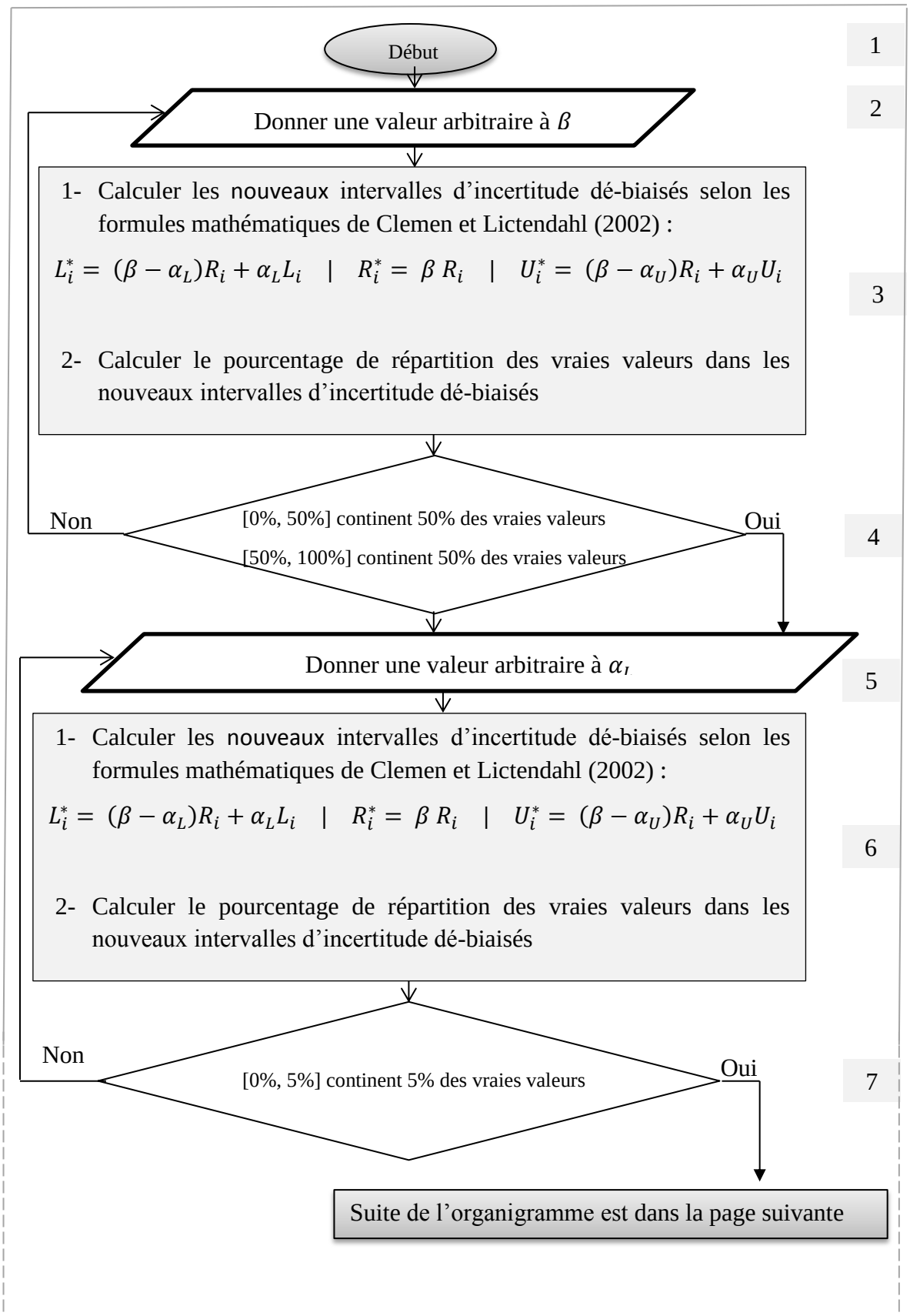
$$L_i^* = (\beta - \alpha_L)R_i + \alpha_L L_i$$
$$R_i^* = \beta\, R_i$$
$$U_i^* = (\beta - \alpha_U)R_i + \alpha_U U_i$$

10. Evaluer le résultat en fonction de la répartition des vraies valeurs dans les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés [95%, 100%] :

Cas 1 (oui) : la répartition des vraies valeurs dans les nouveaux intervalles d'incertitude correspond à 5% dans l'intervalle [95%, 100%]. Passer à l'étape suivante.

Cas 2 (Non) : refuser le résultat et répéter l'étape 5 précédente. En d'autres termes itérer la procédure jusqu'à obtenir une répartition des vraies valeurs de 5% supérieure au quantile maximal q95%.

11. En cas d'acceptation du résultat final, mémoriser les valeurs finales des coefficients de correction et arrêter la procédure de calcul.
12. Fin de calcul


Début
1
Donner une valeur arbitraire à β
2
1- Calculer les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés selon les formules mathématiques de Clemen et Lictendahl (2002) :
$L_i^* = (\beta - \alpha_L)R_i + \alpha_L L_i \quad | \quad R_i^* = \beta R_i \quad | \quad U_i^* = (\beta - \alpha_U)R_i + \alpha_U U_i$
2- Calculer le pourcentage de répartition des vraies valeurs dans les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés
3
Non
[0%, 50%] continent 50% des vraies valeurs
[50%, 100%] continent 50% des vraies valeurs
Oui
4
Donner une valeur arbitraire à α_i
5
1- Calculer les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés selon les formules mathématiques de Clemen et Lictendahl (2002) :
$L_i^* = (\beta - \alpha_L)R_i + \alpha_L L_i \quad | \quad R_i^* = \beta R_i \quad | \quad U_i^* = (\beta - \alpha_U)R_i + \alpha_U U_i$
2- Calculer le pourcentage de répartition des vraies valeurs dans les nouveaux intervalles d'incertitude dé-biaisés
6
Non
[0%, 5%] continent 5% des vraies valeurs
Oui
7
Suite de l'organigramme est dans la page suivante

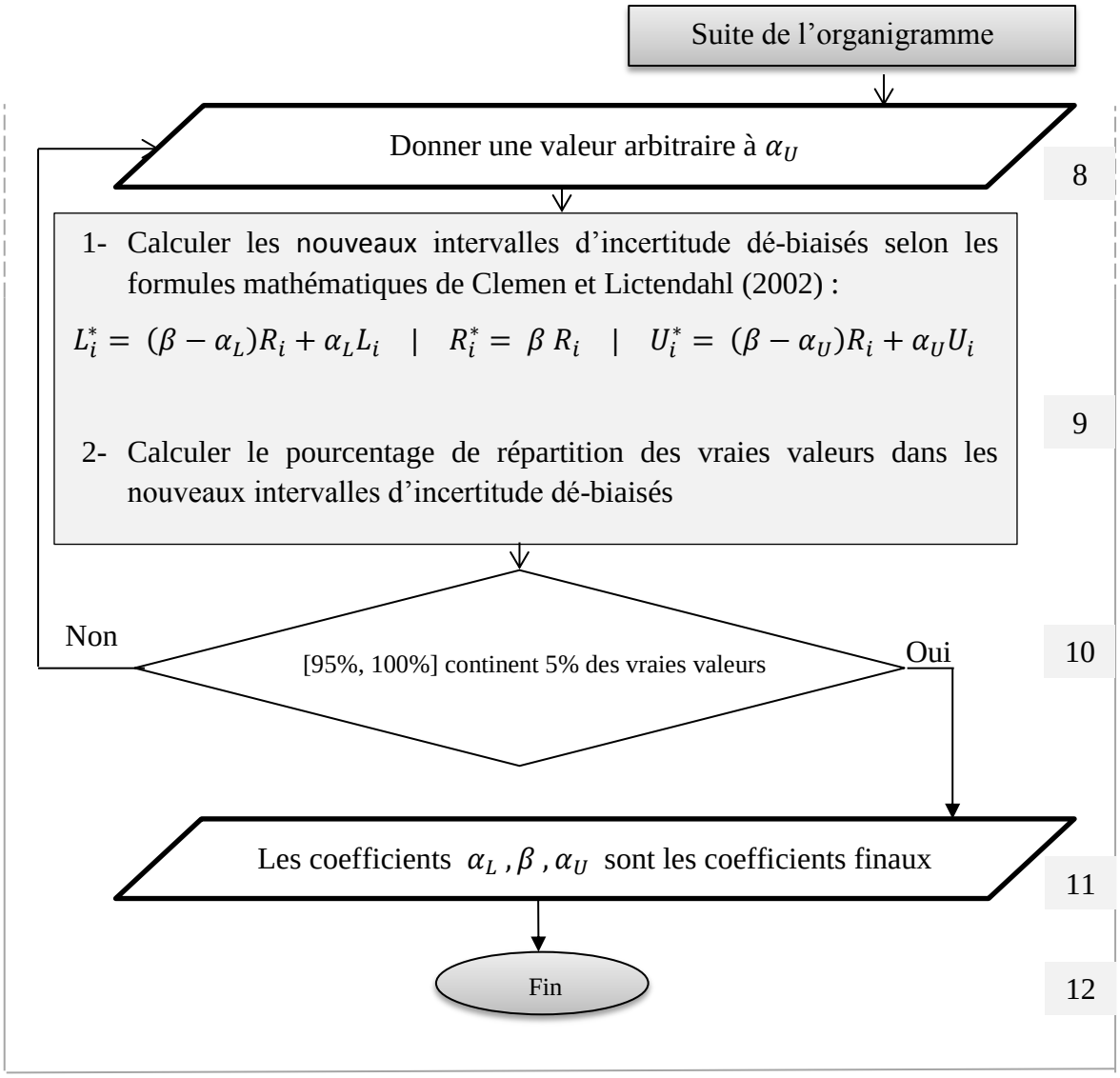


Figure 6-2. Organigramme de la démarche mathématique développée pour l'adaptation du modèle de Clemen et Lichtendahl (2002) au domaine des digues

6.4.2 Exemple d'application au domaine des digues

En se basant sur les principes du modèle de Clemen et Lichtendahl (2002) et sur notre proposition mathématique de mise en œuvre d'un protocole simplifié pour calculer des coefficients de correction, nous poursuivons l'exemple précédent pour calculer les facteurs de correction des avis du panel d'experts déjà calibrés et agrégés. Le Tableau 6-18 présente les valeurs finales des coefficients de correction relatives à la distribution calibrée et agrégée des avis experts du panel.

Tableau 6-18. Facteurs de correction déterminés par rapport aux distributions calibrées et agrégées des trois experts données sur les quatre variables de calibration

	Quantile 5% α_L	Quantile 50% β	Quantile 95% α_u
Facteurs de correction	1.08	1.16	1.64

Avant de réaliser un retour critique sur le résultat obtenu issu de cet exemple, nous effectuons tout d'abord dans la suite une analyse générale sur la phase dé-biaisage des avis experts :

Analyse générale sur la phase dé-biaisage des avis experts

Dans un cas idéal et sans présences de biais entachant les avis experts et d'incertitudes sur les données d'entrées, les élicitations expertes ne sont pas biaisées et par conséquent n'ont pas besoin de traitement de dé-biaisage. Cela se présente mathématiquement par rapport aux coefficients de correction de la manière suivante :

- La borne inférieure dé-biaisée = la borne inférieure biaisée de l'intervalle d'incertitude : $L^* = L \implies \alpha_L = \frac{R^* - L^*}{R - L} = 1$
- La valeur la plus vraisemblable dé-biaisée = la valeur la plus vraisemblable biaisée de l'intervalle d'incertitude : $R^* = R \implies \beta = \frac{R^*}{R} = 1$
- La borne supérieure dé-biaisée = la borne supérieure biaisée de l'intervalle d'incertitude : $U^* = U \implies \alpha_u = \frac{U^* - R^*}{U - R} = 1$

En d'autres termes et selon les probabilités des intervalles interquantiles nous pouvons expliquer mathématiquement le cas idéal de la manière suivante :

- l'expert a 5% de marge d'erreur pour donner des estimations au-dessous de l'intervalle d'incertitude.
- l'expert a 5% de marge d'erreur pour donner des estimations au-dessus de l'intervalle d'incertitude.

Mais en réalité la présence des biais notamment le biais de sur-confiance ou sous-confiance déséquilibrent les marges d'erreur acceptées et provoquent des distributions expertes biaisées. Pour traiter ce problème de biais, il est nécessaire de pouvoir déterminer quantitativement l'erreur commise, implicitement par l'expert, par l'identification des coefficients de correction convenables et par conséquent corriger son avis biaisé (ses élicitations biaisées). Cela est explicable par rapport aux coefficients de correction :

- Le facteur de correction $(\beta < 1)$ reflète que l'expert a tendance à majorer ses estimations concernant les valeurs les plus vraisemblables (R_i) de $\left(\frac{1}{\beta}\right)$ fois plus de ce qu'elles devraient être.
- Ou inversement, le facteur de correction $(\beta > 1)$ reflète que l'expert a tendance à minorer ses estimations concernant les valeurs les plus vraisemblables (R_i) de $\left(\frac{1}{\beta}\right)$ fois moins de ce qu'elles devraient être.

En d'autres termes, nous pouvons dire que l'expert, lors de la phase d'élicitation, élicite la vraie valeur la plus vraisemblable **dé-biaisée** R_i^* mais qui est biaisée implicitement par le coefficient $\frac{1}{\beta}$

$$R_i = \frac{1}{\beta} * R_i^*$$

Et pour corriger donc la valeur la plus vraisemblable R_i élicitée par l'expert il faut la multiplier par le coefficient β selon la formule de correction suivante :

$$R_i = \frac{1}{\beta} * R_i^* \implies R_i^* = \beta R_i$$

Il en va de même pour ce qui concerne la borne inférieure de l'intervalle d'incertitude :

- le facteur de correction ($\alpha_L < 1$) reflète que les distances estimées entre (L_i) et (R_i) tendent à être majorées par rapport à ce qu'elles devraient être.
- Ou inversement, le facteur de correction ($\alpha_L > 1$) reflète que les distances estimées entre (L_i) et (R_i) tendent à être minorées par rapport à ce qu'elles devraient être.

Pour corriger cette erreur il faut corriger la distance entre la borne inférieure biaisée (L_i) et la valeur la plus vraisemblable biaisée (R_i). Cela est réalisé par l'utilisation de coefficient de correction de la valeur la plus vraisemblable biaisée (β) et celui de la borne inférieure biaisée(α_L) selon la formule de correction suivante :

$$L_i^* = R_i^* - \alpha_L(R_i - L_i) = \beta R_i - \alpha_L(R_i - L_i) = (\beta - \alpha_L)R_i + \alpha_L L_i$$

Il en va exactement de même pour ce qui concerne la borne supérieur de l'intervalle d'incertitude :

- Le facteur de correction ($\alpha_U < 1$) reflète que les distances estimées entre (R_i) et (U_i) tendent à être majorée par rapport à ce qu'elles devraient être.
- Ou inversement, le facteur de correction ($\alpha_U > 1$) reflète que les distances estimées entre (R_i) et (U_i) tendent à être minorées par rapport à ce qu'elles devraient être.

Pour corriger cette erreur il faut corriger la distance entre la borne supérieure biaisée (U_i) et la valeur la plus vraisemblable biaisée (R_i). Cela est réalisé par l'utilisation du facteur de

correction de la valeur la plus vraisemblable biaisée (β) et celui de la borne supérieure biaisée (α_U) selon la formule de correction suivante :

$$U_i^* = R_i^* + \alpha_U(U_i - R_i) = \beta R_i + \alpha_U(U_i - R_i) = (\beta - \alpha_U)R_i + \alpha_U U_i$$

Où :

L, R, U : les élicitations expertes données sous une forme d'intervalle d'incertitude contenant respectivement les valeurs : L : faible (Low), R : référence (Reference) et U : élevé (Upper)

α_L : le coefficient de correction concernant la borne inférieure, de l'intervalle d'incertitude, élicitée par l'expert

β : le coefficient de correction concernant la valeur la plus vraisemblable élicitée par l'expert

α_U : le coefficient de correction concernant la borne supérieure, de l'intervalle d'incertitude, élicitée par l'expert

L_i^* : la borne inférieure de l'intervalle d'incertitude dé-biaisée

R_i^* : la valeur la plus vraisemblable dé-biaisée

U_i^* : la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude dé-biaisée

Analyse des résultats issus de l'exemple d'application au domaine des digues

Le graphique présenté par la Figure 6-3 illustre les valeurs des coefficients de correction déterminées pour notre exemple sur les digues

- Le facteur de correction $(\beta = 1.16 > 1)$ reflète que le panel d'experts a tendance à minorer ses estimations relatives aux variables les plus vraisemblables.
- Le facteur de correction ($\alpha_L = 1.08 > 1$) reflète que les distances estimées entre (L_i) et (R_i) tendent à être proche de ce qu'elles devraient être. Il faut appliquer une majoration de 8% pour obtenir la distance cible.

- Le facteur de correction ($\alpha_U = 1.64 > 1$) reflète que les distances estimées entre (R_i) et U_i sont inférieures de ce qu'elles devraient être. Il faut appliquer une majoration de 64% pour obtenir la distance cible.

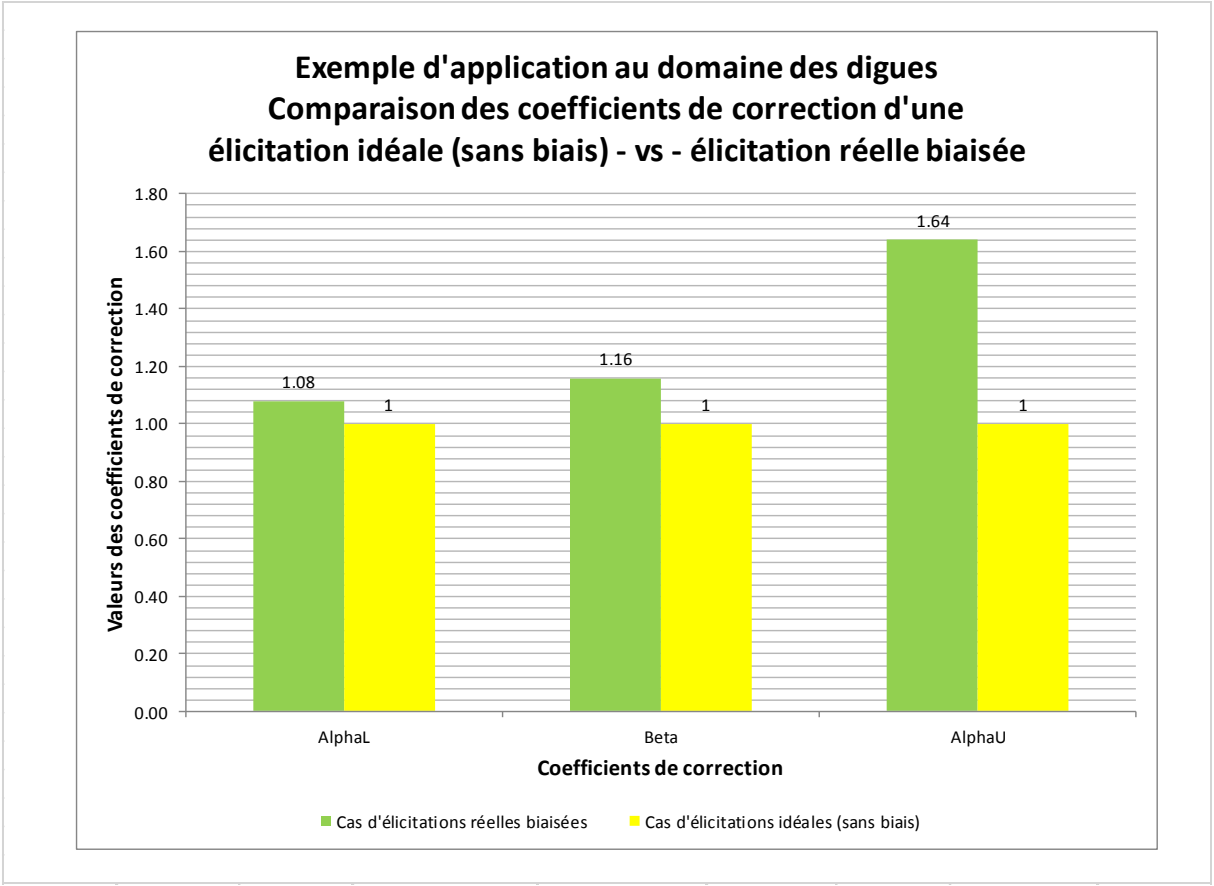


Figure 6-3. Coefficients de correction issus de l'application de la phase de dé-biaisage au domaine des digues

6.5 Approches proposées

L'élicitation, la calibration, l'agrégation et le dé-biaisage sont des démarches indispensables pour une démarche complète d'élicitation et de traitement du jugement d'expert incertain. L'union de ces quatre démarches n'a pas été exploitée dans le domaine du génie civil dans le but de munir les ingénieurs d'un outil fiable pour l'exploitation du jugement expert dans un contexte d'incertitude sur les données. Dans ce contexte et en se basant sur le principe du modèle proposé par Ranjan et Gneiting (2010) concernant la calibration et la ré-calibration des avis experts calibrés, nous proposons de réunir ces quatre démarches dans deux combinaisons d'approche :

- la combinaison « **EiCAD** » : elle prévoit l'**E**licitation **i**ndividuelle, la **C**alibration, l'**A**grégation et le **D**é-biaisage des avis experts.
- la combinaison « **EiDA** » : elle prévoit l'**E**licitation **i**ndividuelle, le **D**é-biaisage et **l'A**grégation des avis experts.

Ce qui différencie l'une par rapport à l'autre est que l'agrégation des avis experts dans « EiCAD » se réalise par une moyenne pondérée tandis que l'agrégation des avis experts dans « EiDA » se réalise par une moyenne simple des avis experts dé-biaisées.

Pour la mise en œuvre de ces deux combinaisons d'approche dans notre domaine de digues fluviales, nous proposons de les appliquer en se basant sur le principe de Cooke (1991) concernant l'identification des variables de calibration. En effet, si le nombre de variables de calibration est important il est possible de les désagréger en créant des ensembles distincts puis, d'appliquer séparément la calibration pour chaque ensemble et par conséquent déterminer pour chaque ensemble un poids de calibration (Cooke, 1991). En se basant sur cette idée nous proposons d'appliquer dans notre contexte de recherche la combinaison d'approche « EiCAD » et « EiDA » selon trois modalités d'application qui se différencient par le type de variable calibration utilisée et ce qui permet après d'examiner la sensibilité des approches développées à ces différents types de variables de calibration :

- **1ère modalité**
  Les variables de calibration sont les facteurs de sécurité (FS) (variables déterministes) et les probabilités conditionnelles de défaillance (P_{fc}) (variables probabilistes).
- **2ème modalité**
  Les variables de calibration sont uniquement les facteurs de sécurité (FS) (variables déterministes)
- **3ème modalité**
  Les variables de calibration sont uniquement les (P_{fc}) (variables probabilistes)

Dans la suite nous détaillons les deux approches ainsi que leurs trois modalités d'application au domaine des digues fluviales.

6.5.1 Approche « **EiCAD** »

1. **E**liciter les avis experts d'un panel **i**ndividuellement sur les variables de calibration ainsi que sur les variables d'intérêt ;
2. **C**alibrer les avis experts par les poids de calibrations calculés selon le modèle de calibration classique de Cooke (1991) ;
3. **A**gréger les avis experts calibrés selon le protocole d'agrégation de la moyenne de quantile proposée par Lichtendahl *et al.* (2013) ;
4. **D**é-biaiser les avis experts (agrégés et calibrés) par les facteurs de correction calculés selon le principe du modèle de dé-biaisage de Clemen et Lichtendahl (2002).

Tableau 6-19. Détail de la combinaison « EiCAD » et ses différentes modalités d'application au domaine des digues

<table>
<tr><th>Approche « EiCAD »</th><th>Modalité (1)</th><th>Modalité (2)</th><th>Modalité (3)</th></tr>
<tr><td>1
Eliciter les avis experts d'un panel individuellement sur les variables de calibration ainsi que sur les variables d'intérêt</td><td>Variable de calibration (VC)
Les VC sont :
- Les facteurs de sécurité (Fs) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement.
- Les probabilités de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement
Variables d'intérêt (VI)
Les VI sont les probabilités subjectives de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par : Erosion Interne, Erosion Externe, Surverse</td><td>Variable de calibration (VC)
Les VC sont :
- Les facteurs de sécurité (Fs) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement.
Variables d'intérêt (VI)
Les VI sont les probabilités subjectives de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par : Erosion Interne, Erosion Externe, Surverse</td><td>Variable de calibration (VC)
Les VC sont :
- Les probabilités de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement
Variables d'intérêt (VI)
Les VI sont les probabilités subjectives de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par : Erosion Interne, Erosion Externe, Surverse</td></tr>
<tr><td>2
Calibrer les avis experts par le poids de calibration calculé selon le modèle de calibration classique de Cooke (1991)</td><td colspan="3">- Calculer le poids de calibration de chaque expert en utilisant le modèle de calibration classique de Cooke (1991).
- Calibrer par les poids de calibration déterminés :
• Les VC
• Les VI</td></tr>
<tr><td>3
Agréger les avis experts calibrés selon la modalité d'agrégation de la</td><td colspan="3">- Agréger par la modalité d'agrégation de Lichtendahl et al. (2013) :
• Les VC calibrées
• Les VI calibrées</td></tr>
</table>

Approche « EiCAD »	Modalité (1)	Modalité (2)	Modalité (3)
moyenne de quantile proposée par Lichtendahl *et al.* (2013)			
4 **D**é-biaiser l'avis expert (calibré et agrégé) par les coefficients de correction calculés selon le modèle de dé-biaisage de Clemen et Lichtendahl (2002) modifié	Dé-biaiser les (Fs)et les (P_{fc}) par les coefficients de correction calculé via les (Fs)et les (P_{fc}).	Dé-biaiser les (Fs)et les (P_{fc}) par les coefficients de correction calculé via les (Fs). Cela va permettre de visualiser l'effet de dé-biaisage sur les (P_{fc}) qui n'ont pas été prises en compte pour déterminer les facteurs de correction	Dé-biaiser les (Fs) et les (P_{fc}) par les coefficients de correction calculé via les (P_{fc}). Cela va permettre de visualiser l'effet de dé-biaisage sur les (Fs)qui n'ont pas été pris en compte pour déterminer les facteurs de correction
	L'objectif et d'identifier la meilleur modalité pour le domaine des digues		

L'organigramme suivant illustre la procédure mathématique de l'application de chaque phase d'« EiCAD » et ses résultats finaux attendus. Puis à la fin, il illustre la ré-application de la phase de calibration sur les distributions finales de variables de calibration (distribution Calibrées, Agrégées et Dé-biaisées) afin d'évaluer par le modèle de Cooke (1991) : la justesse (score de calibration) et la précision (score d'entropie) des résultats finaux obtenus issus de l'application des trois modalités. Cela permettre de pouvoir opter pour une meilleur modalité d'application de l'approche « EiCAD » pour le domaine des digues. Les étapes de cette procédure sont :

1. Début de la procédure de l'application d'« EiCAD »
2. Phase d'élicitation et de recueillement des élicitations expertes
3. Obtention des variables de calibration (VC) et des variables d'intérêt (VI) qui se présentent respectivement par :
    - VC : Facteur de sécurité au glissement (Fs) & Probabilité de défaillance au glissement (P_{fc})
    - VI : P_{fc} : Probabilité de défaillance à l'érosion interne, à l'affouillement et à la surverse.
4. Choisir les variables de calibration convenables pour la mise en œuvre de chaque modalité d'application :
    - 1ère modalité : les variables de calibration sont les Fs et les P_{fc}
    - 2ème modalité : les variables de calibration sont les Fs
    - 3ème modalité : les variables de calibration sont les P_{fc}
5. Phase de Calibration des avis experts dont le résultat est un poids de calibration
6. Phase d'Agrégation des avis experts calibrés dont le résultat est une distribution calibrée et agrégée de toutes les élicitations expertes données pour chaque variable de calibration
7. Phase de Dé-biaisage des avis experts calibrés et agrégés dont le résultat est les facteurs de correction
8. Obtention, pour chaque variable de calibration et pour chaque modalité d'application, d'une distribution finale calibrée, agrégée et dé-biaisée

9. Réappliquer de nouveau la phase de calibration pour calibrer les résultats finaux issus des trois modalités d'application afin d'opter, en se basant sur le poids de calibration, pour une meilleur modalité d'application de l'approche « EiCAD » pour le domaine des digues
10. La meilleure modalité d'application est la modalité ayant le poids de calibration le plus élevé par rapport aux autres modalités. Un poids de calibration optimal signifie :
    - la justesse (score de calibration) est assurée dans les nouveaux intervalles d'incertitude calibrés et, agrégés et dé-biaisés. Ce qui signifie que les nouveaux intervalles d'incertitude contiennent le maximum des vraies valeurs des variables de calibration
    - la précision (score d'entropie) est assurée dans les nouveaux intervalles d'incertitude calibrés, agrégés et dé-biaisés. Ce qui signifie que les nouveaux intervalles d'incertitude sont précis et ne sont pas entachés par le biais de sur ou sous confiance.
11. Appliquer le poids de calibration et les facteurs de correction issus de la meilleure modalité d'application pour calibrer, agréger et dé-biaiser les avis experts donnés sur les variables d'intérêt
12. Fin de la procédure de l'application d'« EiCAD »

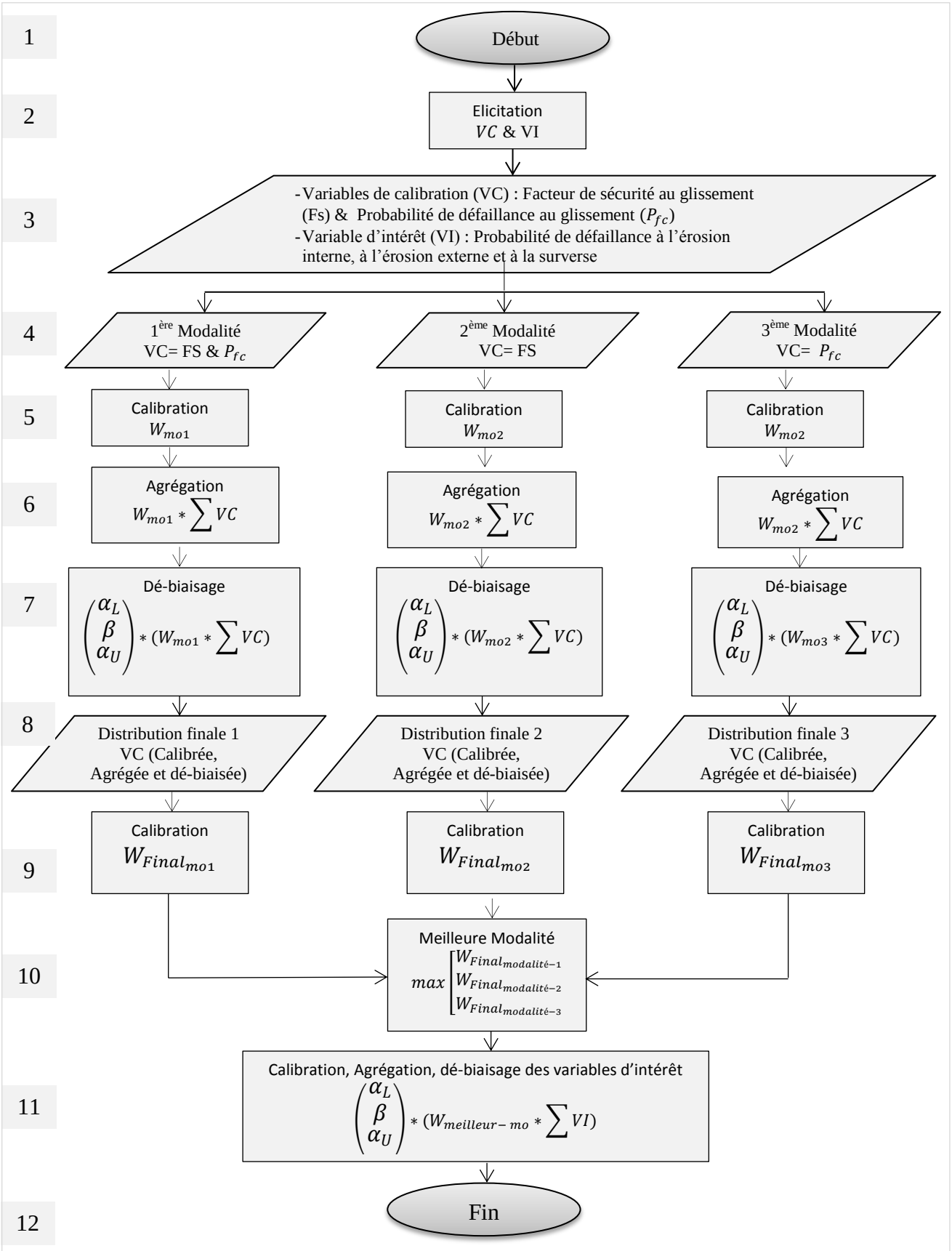


Figure 6-4. Organigramme d'application de l'approche "EiCAD" et choix d'une modalité convenable aux digues

6.5.2 Combinaison « **EiDA** »

1. **E**liciter les avis experts d'un panel **i**ndividuellement sur les variables de calibration ainsi que sur les variables d'intérêt ;
2. **D**é-biaiser les avis experts par les facteurs de correction calculés selon le principe du modèle de dé-biaisage de Clemen et Lichtendahl (2002) ;
3. **A**gréger les avis experts dé-biaisés par le protocole d'agrégation de la moyenne de quantile proposée par Lichtendahl *et al.* (2013).

Tableau 6-20. Détail de la combinaison « EiDA » et ses différentes modalités d'application au domaine des digues

<table>
<tr><th>Approche « EiDA »</th><th>Modalité (1)</th><th>Modalité (2)</th><th>Modalité (3)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1

Eliciter les avis experts d'un panel individuellement sur les variables de calibration ainsi que sur les variables d'intérêt</td><td>Variable de calibration (VC)
Les VC sont :
- Les facteurs de sécurité (Fs) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement.
- Les probabilités de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement</td><td>Variable de calibration (VC)
Les VC sont :
- Les facteurs de sécurité (Fs) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement.</td><td>Variable de calibration (VC)
Les VC sont :
- Les probabilités de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par glissement</td></tr>
<tr><td>Variables d'intérêt (VI)
Les VI sont les probabilités subjectives de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par : Erosion Interne, Erosion Externe, Surverse</td><td>Variables d'intérêt (VI)
Les VI sont les probabilités subjectives de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par : Erosion Interne, Erosion Externe, Surverse</td><td>Variables d'intérêt (VI)
Les VI sont les probabilités subjectives de défaillance (P_{fc}) de la digue vis-à-vis du scénario de rupture par : Erosion Interne, Erosion Externe, Surverse</td></tr>
<tr><td>2

Dé-biaiser les avis experts par les coefficients de correction calculés selon le modèle de dé-biaisage de Clemen et Lichtendahl (2002)</td><td colspan="3">- Calculer les coefficients de correction pour chaque expert du panel en utilisant la modèle mathématique de Clemen et Lichtendahl (2002)
- Dé-biaiser les VI par les facteurs de correction.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3

Agréger les avis experts dé-biaisés par la modalité d'agrégation de la moyenne de quantile proposée par Lichtendahl et al. (2013)</td><td colspan="3">- Agréger par la modalité d'agrégation de Lichtendahl et al. (2013) :
• Les VC dé-biaisées
• Les VI élicitées</td></tr>
<tr><td colspan="3">L'objectif et d'identifier la meilleur modalité pour le domaine des digues</td></tr>
</table>

L'organigramme suivant illustre la procédure mathématique de l'application de chaque phase d'« EiDA » et ses résultats finaux attendus. Puis à la fin, il illustre l'application de la phase de calibration sur les distributions finales de variables de calibration (distribution Dé-biaisées et Agrégées) afin d'évaluer par le modèle de Cooke (1991) : la justesse (score de calibration) et la précision (score d'entropie) des résultats finaux obtenus issus de l'application des trois modalités. Cela permet de pouvoir opter pour une meilleure modalité d'application de l'approche « EiDA » pour le domaine des digues. Les étapes de cette procédure sont :

1. Début de la procédure de l'application de l'approche « EiDA »
2. Phase d'élicitation et de recueillement du jugement d'expert
3. Obtention des variables de calibration (VC) et des variables d'intérêt (VI) qui se présentent respectivement par :
    - VC : Facteur de sécurité au glissement (Fs) & Probabilité de défaillance au glissement (P_{fc})
    - VI : Probabilité de défaillance (P_{fc}) à l'érosion interne, à l'affouillement et à la surverse.
4. Choisir les variables de calibration convenables pour la mise en œuvre de chaque modalité d'application :
    - $1^{ère}$ modalité : les variables de calibration sont les Fs et les P_{fc}
    - $2^{ème}$ modalité : les variables de calibration sont les Fs
    - $3^{ème}$ modalité : les variables de calibration sont les P_{fc}
5. Phase de Dé-biaisage des avis experts bruts dont les résultats sont les facteurs de correction
6. Phase d'Agrégation des avis experts dé-biaisés dont le résultat est une distribution dé-biaisée et agrégée de toutes les élicitations expertes données pour chaque variable de calibration
7. Obtention, pour chaque variable de calibration et pour chaque modalité d'application, d'une distribution dé-biaisée et agrégée
8. Utiliser les indicateurs de la phase de calibration (scores d'entropies, score de calibration) pour évaluer les résultats finaux issus des trois modalités d'application afin d'opter, en se basant sur le poids de calibration, pour une meilleur modalité d'application de l'approche « EiDA » pour le domaine des digues.
9. La meilleure modalité d'application est la modalité ayant le poids de calibration le plus élevé par rapport aux autres modalités.
10. Dé-biaiser par les facteurs de correction issus de la meilleure modalité d'application et agréger les avis experts donnés sur les variables d'intérêt.
11. Fin de la procédure de l'application d'« EiDA »

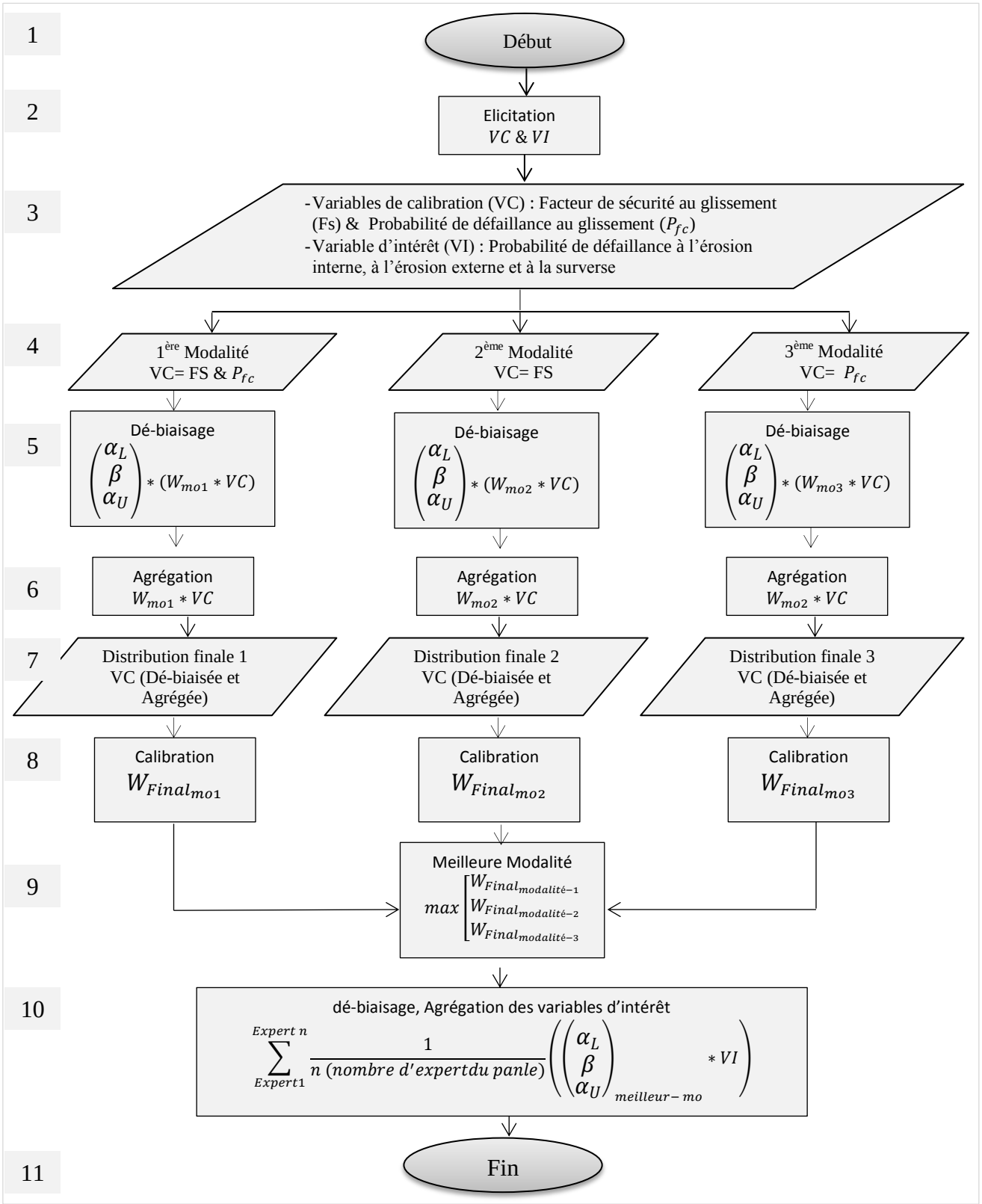


Figure 6-5. Organigramme d'application de l'approche "EiDA" et choix d'une modalité convenable aux digues

6.6 **Synthèse**

L'application des principes d'élicitation, de calibration, d'agrégation et de dé-biaisage au domaine des digues est conditionnée par l'identification des variables de calibration pertinentes issues du domaine des digues. Le manque de données statistiques et le manque de retours d'expérience sur le comportement de défaillance des digues ainsi que l'impossibilité de conduire des analyses probabilistes rigoureuses rendent le contexte d'identification des variables de calibration délicat. Dès lors et afin de construire notre méthodologie d'évaluation de la fiabilité structurelle des digues sur des bases solides, nous avons fait le choix de privilégier les approches quantitatives pour identifier des variables de calibration fiables, crédibles et intuitives.

Ainsi, le choix comme variables de calibration des facteurs de sécurité et des probabilités de défaillance calculés quantitativement vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement représente une source fiable de valeurs sur lesquelles le poids de calibration et les coefficients de correction des avis experts seront déterminés. Cela en vue d'un traitement fiable des variables d'intérêt des digues (probabilité de défaillance vis-à-vis des mécanismes de rupture de digue par érosion interne, par affouillement et par surverse) pour lesquelles une analyse quantitative est impossible à mettre en place.

Ensuite, pour l'application des principes d'élicitation, de calibration, d'agrégation et de dé-biaisage des avis experts au domaine de génie civil nous proposons deux combinaisons d'approche : « **EiCAD** » et « **EiDA** ». Elles présentent aux ingénieurs un outil scientifique fiable pour l'exploitation du jugement expert dans un contexte d'incertitude et de manque de données puisqu'elles sont basées sur :

- un protocole complet pour éliciter des avis experts incertains sous format probabiliste ;
- un protocole complet pour calibrer et agréger des avis experts ;
- un protocole complet pour traiter quantitativement des biais de sur-confiance ou sous-confiance susceptibles d'entacher les élicitations expertes

Dans la suite nous nous focalisons sur la mise en œuvre au domaine des digues fluviales les deux combinaisons d'approche « **EiCAD »** et « **EiDA »** avec comme objectif d'identifier la meilleure modalité de leur application et la meilleure combinaison d'approches. Pour répondre à cet objectif, nous proposons d'appliquer dans la dernière partie III « A*pplication et valorisation »* ces deux combinaisons d'approches à une étude de cas de digue.

Partie III

Application et valorisation

Contenu de la Partie III

Chapitre 7 ▪ Présentation de la digue du Drac rive gauche

Chapitre 8 ▪ Application d'« EiCAD »

Chapitre 9 ▪ Application d'« EiDA »

Chapitre 10 ▪ Comparaison d'« EiCAD » et d'« EiDA »

7 Présentation de l'étude de cas

La digue du Drac implantée en rive gauche représente la digue de notre cas d'étude sur laquelle l'application de notre démarche sera effectuée.

Il s'agit d'une digue de protection contre les inondations de classe A (au sens du décret du 11/12/2007) qui a fait l'objet d'une étude de dangers.

Le choix de privilégier, dans cette recherche, le côté rive gauche au côté rive droite est lié au risque d'inondation plus élevé pour le côté rive gauche (RG) que pour le côté rive droite (RD). En effet, la digue en rive droite a une revanche plus grande que la digue en rive gauche et les débordements du Drac en crue auront donc lieu plutôt en rive gauche qu'en rive droite. Cela signifie que le côté du Drac rive droite est plus sécurisé que le côté rive gauche.

Dans cette application nous étudions le mécanisme de rupture par érosion interne.

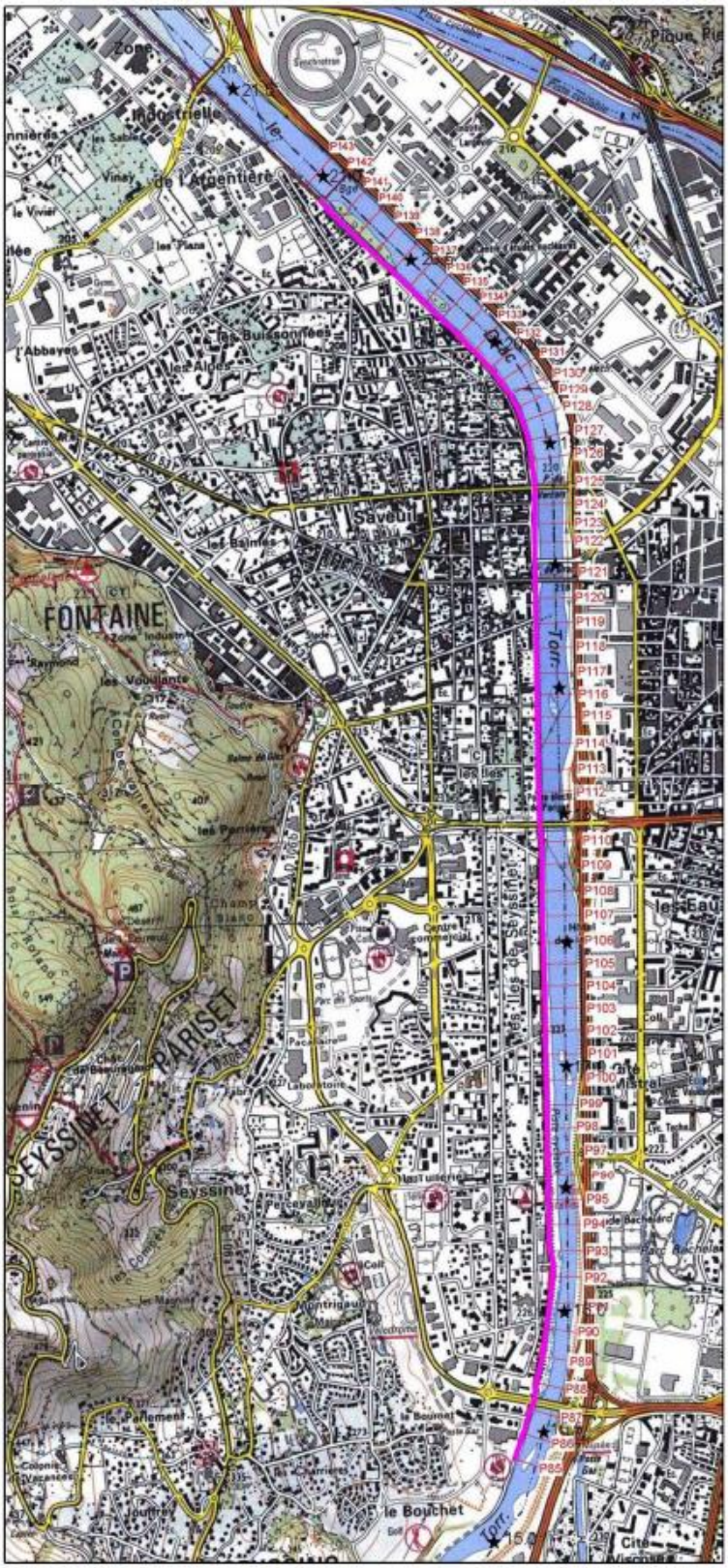


Figure 7-1. Plan général de la digue du Drac rive gauche.

L'étude de dangers (EDD, 2012) relative à cet ouvrage réalisée en 2012 par le bureau d'étude SOGREAH-Groupe Artelia pour le compte de l'Association Départementale Isère-Drac-Romanche (ADIDR) permet l'identification des caractéristiques géométriques, géotechniques et hydrauliques nécessaires pour la mise en œuvre des approches « **EiCAD** » et « **EiDA** ». Précisément, ces caractéristiques techniques serviront à identifier des profils pertinents de cet ouvrage ainsi que les variables de calibration et d'intérêt pour la mise en œuvre des approches développées dans cette recherche. Dès lors nous présentons dans ce chapitre les données géométriques, géotechniques et hydrauliques relatives à la digue du cas d'étude du Drac rive gauche.

7.1 Données géométriques

La digue de classe A étudiée est implantée en rive gauche du lit mineur du Drac aval dans le département Isère. Son linéaire total est d'environ 5500 mètres. La classe « A » désigne une hauteur d'ouvrage (H) égale ou supérieure à un mètre et une population maximale (P) exprimée en nombre d'habitants résidant dans la zone protégée égale ou supérieure à 50000 habitants.

L'endiguement du lit du Drac, lié à une forte pression anthropique, a débuté dès le 16ème siècle. Il a été complété au 18ème siècle et au19^{ème} siècle et s'est terminé dans les années 1950. Il est à noter que cette digue est un ouvrage public construit sur des terrains publics.

Elle a été mise en œuvre à partir du 18ème siècle (Canal Jourdan) dans l'objectif de protéger la ville de Grenoble contre les inondations. La zone protégée par la digue considérée couvre la plaine de Grenoble. Les principaux enjeux de sécurité publique (concernés par une éventuelle défaillance de la digue) concernent un total d'environ 38000 personnes résidentes et saisonnières ainsi que 477 établissements relevant du public (centres commerciaux, établissements scolaires, établissements de soins…) classés de catégorie 1 à 5 selon le code de la construction et de l'habitation.

La gestion de l'ouvrage est assurée par l'ADIDR « Association Départementale Isére-Drac-Romanche ». Cela comprend : l'entretien, la surveillance en situation normale, en période de crue, en période post-crue et l'organisation mise en place pour faire face aux phénomènes naturels et aux situations exceptionnelles.

Du point de vue structurel, le linéaire de la digue a été découpé en trois tronçons suivants :

Tronçon 1
du P85 au P118

Le plus long tronçon, il mesure 3325 mètres et correspond à une digue en terre.

La géométrie de l'ouvrage se caractérise de la façon suivante :

- La hauteur de digue est assez élevée et est comprise entre 2.0 et 4.9 mètres ;
- Largeur en crête varie entre 2.9 et 10.5 m ;
- Les fruits des talus côté rivière varient entre 3H/2V et 1H/1V, correspondant à des pentes assez fortes.

Tronçon 2
du P118 au P125

Le plus court, il mesure environ 670 mètres. Ce tronçon est marqué par la concentration de trois ponts (pont du Drac, pont Esclangon et pont du Vercors) et par la présence d'une voirie lourde en crête (milieu urbain dense).

La géométrie de l'ouvrage se caractérise de la façon suivante :

- La hauteur de digue est comprise entre 0 et 6.2 mètres ;
- La largeur en crête varie entre 3.6 et 8.8 m ;
- Les fruits des talus côté rivière varient entre 3H/2V et 2H/1V.

Tronçon 3
du P125 au P142

Il mesure environ 1500 mètres et correspond à une digue en remblai. Ce tronçon a fait l'objet de travaux récents de confortement (2009) côté rivière par la pose d'enrochements sur tout son linéaire. La géométrie de l'ouvrage se caractérise de la façon suivante :

- La hauteur de digue est comprise entre 2.2 et 5.4 mètres ;
- La largeur en crête varie entre 2.8 et 5.9 m ;
- Les fruits des talus côté rivière varient entre 3H/2V et 2H/1V.

Ci-dessous, une présentation photographique de quelques profils issus de l'étude de dangers, permettant une visualisation de cet ouvrage (EDD, 2012) :

Figure 7-2. Tronçon 1, Profil P91 - Vue vers l'aval

Figure 7-3. Tronçon 1, Profil P93 - Vue vers l'aval

Figure 7-4. Tronçon 1, Profil : P97/98 - Vue vers l'aval : limite de propriété côté plaine

Figure 7-5. Tronçon 1, Profil : P107 - Vue vers l'aval : voie d'accès de la rue Sisteron et aire de repos

Figure 7-6. Tronçon 2, Profil : P119 - Vue vers l'aval : voirie lourde en crête et talus côté plaine remblayé (après la rue de Chamrousse)

Figure 7-7. Tronçon 2, Profil : P123 - Vue vers l'aval : mur béton rue de la Liberté

Figure 7-8. Tronçon 2, Profil : P124 - Vue vers l'aval : talus côté rivière mur béton

Figure 7-9. Tronçon 3, Profil : P133 - Vue vers l'aval : voie d’accès et côté plaine remblayé (rue Jean Pain)

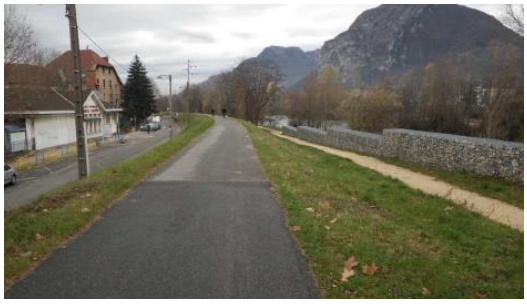


Figure 7-10. Tronçon 3, Profil : P128 - Vue vers l'aval

Figure 7-11. Tronçon 3, Profil : P136/P137 - Vue vers l'aval : voie d’accès rue Aubert

Figure 7-12. Tronçon 3, Profil : P138 - Vue vers l'aval

Figure 7-13. Tronçon 3, Profil : P39/P140 - Vue vers l'aval : voie d'accès rue des Rachais

7.2 Données géotechniques

Une étude de reconnaissances géotechnique et géophysique a été menée en 2006 par la société IMS_{RN} afin de connaître la composition du corps et de la fondation de la digue (EDD, 2012). Les essais ont été réalisés sur deux secteurs : 1) Secteur « Rive Gauche 1 - RG1 » : entre P93 et P110 et, 2) Secteur « Rive Gauche 2 - RG2 » : entre P136 et P141.

Deux types de matériaux ont été identifiés sur le linéaire de la digue :

- Les matériaux constitutifs du corps de digue de nature sablo-graveleuse ;
- Les matériaux constitutifs de la fondation de la digue sont également de nature sablo-graveleuse.

Les caractéristiques géotechniques adoptées dans l'EDD sur le linéaire de la digue sont présentées dans les tableaux suivants pour les deux secteurs « RG1 » et « RG2 » :

Tableau 7-1. Caractéristiques géotechniques de la composition du corps et de la fondation de la digue du Drac rive gauche pour le secteur « RG1 »

Matériau de la digue	Poids volumique $\gamma\ [kN/m^3]$	Angle de frottement interne $\emptyset\ °$	Cohésion $c\ [kPa]$	Perméabilité $K\ [m/s]$
Corps (P 93 à P 110)	21	35°	0	1.10^{-3}
Fondation (P 93 à P 110)	21	35°	0	10^{-6} à 10^{-5}

Tableau 7-2. Caractéristiques géotechniques de la composition du corps et de la fondation de la digue du Drac rive gauche pour le secteur « RG2 »

Matériau de la digue	Poids volumique $\gamma\ [kN/m^3]$	Angle de frottement interne $\emptyset\ °$	Cohésion $c\ [kPa]$	Perméabilité $K\ [m/s]$
Corps (P 138 à P 141)	21	40°	0	1.10^{-3}
Corps (P 136)	21	35°	0	1.10^{-3}
Fondation (P 136 à P 141)	21	32°	0	5.10^{-7}

7.3 **Données hydrauliques**

Une étude d'inondabilité du Drac et de la Romanche a été réalisée par le bureau d'études SOGREAH (1999) visant à déterminer les lignes d'eau du Drac rive gauche pour deux gammes de crues, associées à des périodes de retour 200 ans et 500 ans. Les lignes d'eau ont été déterminées par un modèle de calcul hydraulique -1D *Carima*- mis en œuvre en 1999.

Une simulation des crues d'occurrence de 200 ans et de 500 ans en régime permanent a été faite en vérifiant qu'il n'y a aucun débordement possible sur les digues des deux rives. Les résultats des lignes d'eau du Drac sont présentés dans le Tableau 7-3 pour plusieurs profils de la digue et seront utilisés dans notre application ci-après (chapitre 8 et 9).

Tableau 7-3. Données hydrauliques présentant le résultat d'une simulation des crues pour deux gammes de crues associées à des périodes de retour 200 ans et 500 ans pour les profils de la digue du Drac rive gauche

Repères	Cote en crête en [m] NGF	Ligne eau Q500 en [m] NFG	Revanche[1] Q500 en [m]	Ligne eau Q200 en [m] NFG	Revanche Q200 en [m]
P 90	227.85	225.26	2.59	224.64	3.21
P 102	224.4	222.2	2.16	221.26	3.14
P 104	223.60	221.59	2.01	221.03	2.46
P 108	222.69	220.91	1.78	220.35	2.30
P 122	217.84	216.84	1.00	216.31	1.53
P 136	213.66	213.67	-0.01	213.22	0.44
P 138	212.86	213.03	-0.17	212.60	0.26
P 140	212.37	212.42	-0.05	211.99	0.38

[1] Revanche : différence d'altitude entre le niveau de l'eau et la crête, représentatif de la marge de sécurité par rapport au risque de déversement.

7.4 **Synthèse**

L'étude de dangers relative à la digue du Drac rive gauche a permis de déterminer toutes les données nécessaires pour la mise en œuvre des deux approches développées « EiCAD » et « EiDA ». Dès lors en se basant sur ces données, les chapitres suivants de cette partie du manuscrit présentent l'application de chaque phase des approches « EiCAD » et « EiDA » sur la digue de « Drac – rive gauche » selon les sections suivantes :

- la section « application » présentera la mise en œuvre mathématique des différentes phases des deux approches « EiCAD » et « EiDA » ;
- la section « résultats » présentera les résultats issus des calculs et de la mise en œuvre de la phase précédente ;
- la section « discussions » expliquera et présentera un retour critique sur les résultats obtenus ;
- la section « conclusions » conclura l'application de la phase.

Par ailleurs afin de pouvoir identifier le type de variables de calibration convenable et adapté pour l'application des approches développées au domaine des digues ; chaque approche est appliquée selon les trois modalités d'application suivantes :

- 1ère modalité : les facteurs de sécurité au glissement (FS) et les probabilités de défaillance au glissement (P_{fc}) sont les variables de calibration ;
- 2ème modalité : les facteurs de sécurité au glissement (FS) sont les variables de calibration ;
- 3ème modalité : les probabilités de défaillance au glissement (P_{fc}) sont les variables de calibration.

Une comparaison entre les résultats obtenus issus de chaque modalité d'application des approches « EiCAD » et « EiDA » sera présentée à la fin de chaque chapitre relatif. Une analyse inter-comparée des approches fait l'objet du dernier chapitre.

8 Application de l'approche « EiCAD »

Ce chapitre présente l'application des trois modalités d'application de l'approche « EiCAD » à l'étude de cas de la digue du Drac – rive gauche. Le schéma ci-après (Figure 8-1) présente les objectifs de chaque phase de l'approche « EiCAD » pour l'élaboration d'une démarche complète d'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales, à partir du jugement d'expert. Ces quatre phases sont respectivement : 1) l'**E**licitation **i**ndividuelle des avis experts, 2) la **C**alibration des avis experts, 3) l'**A**grégation des avis experts et, 4) le **D**é-biaisage des avis experts.

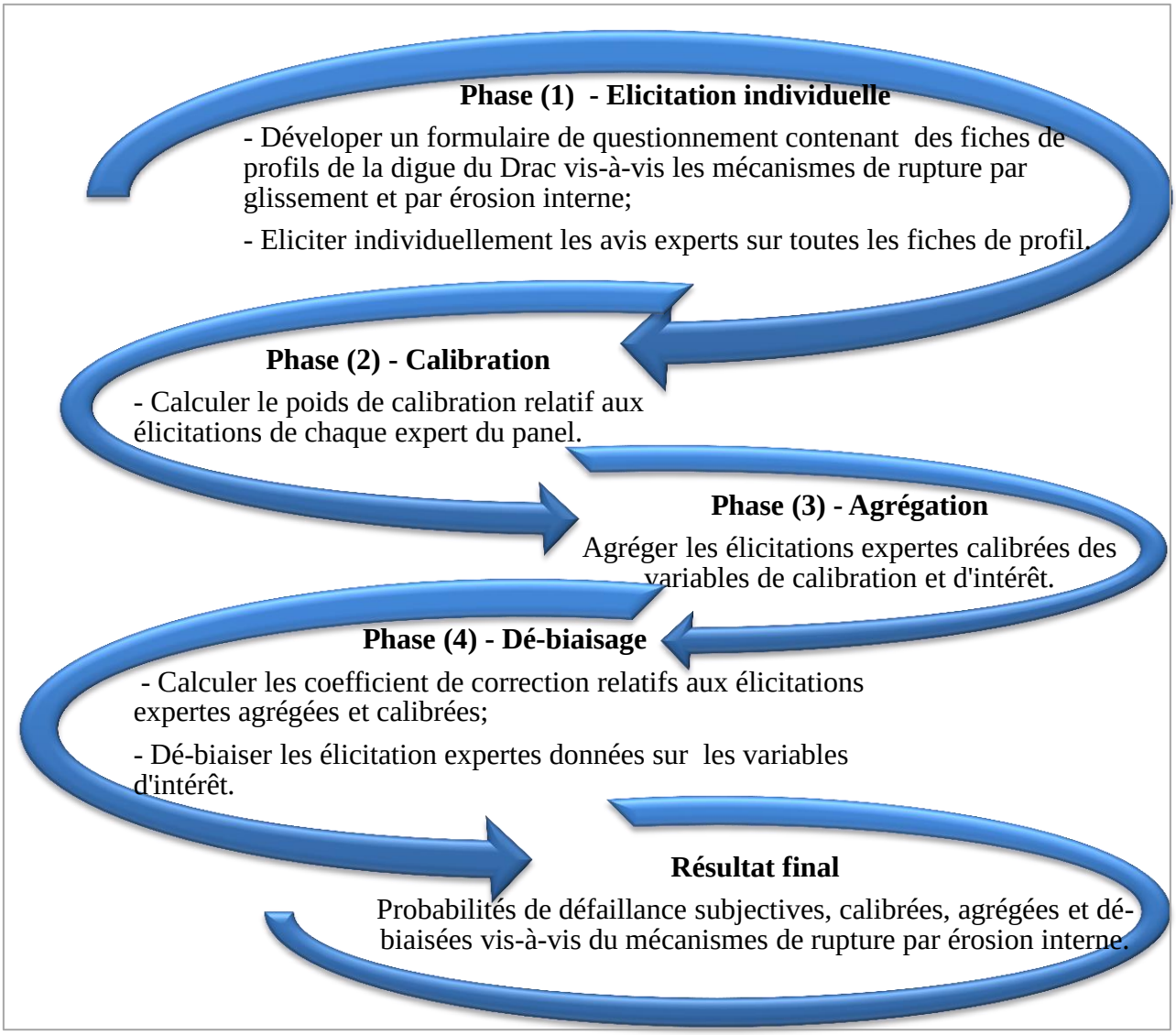


Figure 8-1. Objectifs des phases d'application de l'approche « EiCAD » au domaine des digues fluviales

8.1 Approche « EiCAD » - Elictation individuelle, Calibration, Agrégation et Dé-biaisage des avis experts

8.1.1 Phase d'élicitation individuelle

8.1.1.1 **Application**

L'application de l'approche « EiCAD » et notamment la première phase « Ei » débute par l'élaboration d'un formulaire de questionnement spécifique de l'ouvrage à évaluer-la digue du Drac rive gauche- puis, par l'identification d'un panel d'experts à questionner sur le formulaire développé.

Elaboration du formulaire de questionnement

Pour répondre à cette première phase, nous avons élaboré un formulaire de questionnement en trois parties :

A. présentation de l'ouvrage d'intérêt et de ses différents profils ;

B. formulaire de jugement expert relatif au facteur de sécurité (FS) au glissement ;

C. formulaire de jugement expert relatif à la probabilité de défaillance conditionnelle (P_{fc}) pour les mécanismes de rupture par : glissement, érosion interne et affouillement.

Ce formulaire de questionnement se compose de plusieurs fiches correspondant à :

- des profils de l'ouvrage d'intérêt ;
- des profils théoriques correspondant à des profils idéalisés de l'ouvrage d'intérêt de manière à proposer à l'évaluation des profils variés. Cela permet d'avoir une variété de profils permettant de solliciter le plus largement possible l'expérience des experts lors de la phase d'élicitation.

Afin de disposer d'un échantillon statistique important pour une analyse ultérieure (Field, 2002), le formulaire contient 60 fiches : 30 fiches relatives au facteur de sécurité (FS) et 30 fiches relatives à la probabilité de défaillance conditionnelle (P_{fc}). Chaque fiche présente un profil de digue théorique établi à partir des profils de la digue de Drac, pour lesquels les facteurs de sécurité (FS) ou les probabilités de défaillance des talus sont demandés à être évalués par l'expert. Au final, le formulaire permet de recueillir 30 variables de calibration déterministes et 30 variables de calibration probabilistes. En outre à la fin du formulaire, deux fiches de variable d'intérêt sont présentées pour lesquelles des probabilités de défaillance conditionnelles de l'ouvrage (P_{fc}) sont demandées à être évaluées par l'expert. Un extrait du formulaire contenant quelques profils est présenté dans l'annexe A.

En parallèle à l'élicitation des experts, les variables de calibration (facteur de sécurité et probabilité de défaillance au glissement) sont déterminées par une analyse quantitative au moyen d'une modélisation via un code de calcul géotechnique permettant de déterminer le facteur de sécurité et la probabilité de défaillance par rapport à une sollicitation hydraulique donnée.

En pratique et dans un contexte opérationnel, les calculs des facteurs de sécurité et de probabilité de défaillance d'un talus d'une digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement se fait à l'aide de logiciel de calcul géotechnique spécial : le logiciel GeoStudio (2012), et son module GeoStudio/SLOPE. Informatiquement, GeoStudio (2012) est un logiciel de calcul géotechnique permettant de traiter les différents problèmes du sol comme le glissement des terrains, le tassement, la consolidation, les infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique. Plusieurs modules sont intégrés à ce logiciel :

- ***SLOPE/W*** permet de calculer le facteur de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques.
- ***SEEP/W*** permet de calculer les infiltrations des eaux (par la méthode des éléments finis).
- ***SIGMA/W*** permet d'analyser les problèmes de la relation contraintes / déformations (par la méthode des éléments finis).
- ***QUAKE/W*** permet de définir le comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme (par la méthode des éléments finis).
- ***TEMP/W*** permet d'analyser les problèmes Géothermique du sol (par la méthode des éléments finis).

Dans cette recherche, nous nous intéressons au module ***SLOPE/W*** qui conduit des calculs basés sur l*a « théorie de l'équilibre limite* » pour déterminer le facteur de sécurité des pentes ainsi que la probabilité de défaillance. Le Tableau 8-1 présente les résultats issus de la modélisation numérique (à l'aide de GeoStudio) pour les 30 fiches relatives aux variables de calibration déterministes (facteurs de sécurité (FS) vis-à-vis du mécanisme de défaillance par glissement). Pour chaque fiche, les données sont respectivement :

- le niveau de la crue (HC = crue atteignant la hauteur de la crête de la digue ; 500 = crue de période de retour 500 ans ; 200 = crue de période de retour de 200 ans), régime d'écoulement = (permanent : corps de la digue est saturé / transitoire : corps de digue n'est pas saturé) ;
- le côté de talus (aval/amont) de la digue à évaluer ;
- le facteur de sécurité calculé.

Tableau 8-1. Les variables de calibration déterministes (Fs)

N° fiche	Profil	Crue – régime d'écoulement	Lieu de glissement	FS
1	Digue théorique (1)	HC – régime permanent	Aval	1.62
2	Digue théorique (2)	HC – régime permanent	Aval	1.12
3	Digue théorique (3)	HC – régime permanent	Aval	1.55
4	Digue théorique (4)	HC – régime permanent	Aval	0.68
5	Digue théorique (5)	HC – régime transitoire	Aval	1.41
6	Digue théorique (6)	HC – régime transitoire	Aval	0.93
7	Digue théorique (7)	HC – régime permanent	Aval	0.87
8	Digue théorique (8)	HC – régime permanant	Aval	2.12
9	Digue théorique (9)	HC – régime transitoire	Aval	2.85

N° fiche	Profil	Crue – régime d'écoulement	Lieu de glissement	FS
10	Digue théorique (10)	HC – régime permanent	Aval	0.63
11	Digue théorique (11)	HC – régime permanent	Aval	1.25
12	Digue théorique (12)	HC – régime transitoire	Aval	5.32
13	Digue théorique (13)	HC – régime permanent	Aval	3.82
14	Digue théorique (14)	HC – régime permanent	Aval	1.36
15	Digue théorique (15)	HC – régime permanent	Aval	0.77
16	Digue théorique (16)	HC – régime transitoire	Aval	2.31
17	Digue théorique (17)	HC – régime permanent	Aval	2.33
18	Digue théorique (18)	HC – régime permanent	Aval	0.93
19	Digue théorique (19)	HC – régime permanent	Aval	0.54
20	Digue théorique (20)	HC – régime permanent	Aval	1.53
21	Digue théorique (21)	HC – régime permanent	Aval	1.92
22	Digue théorique (22)	HC – régime permanent	Aval	0.55
23	Digue théorique (23)	HC – régime permanent	Aval	0.98
24	Digue théorique (24)	HC – régime permanent	Aval	1.16
25	P90 - Drac	500– régime permanent	Aval	1.48
26	P90 - Drac	HC– régime permanent	Aval	0.92
27	P102 - Drac	200– régime permanent	Aval	1.19
28	P104 - Drac	HC– régime permanent	Aval	0.66
29	P122 - Drac	HC – régime transitoire	Amont	0.95
30	140 - Drac	500– régime permanent	Aval	0.91

Le Tableau 8-2 présente les résultats issus d'une analyse de fiabilité par simulations de Monte Carlo (à l'aide de GeoStudio) pour les 30 fiches relatives aux variables de calibration probabilistes (probabilités de défaillance conditionnelle (P_{fc}) vis-à-vis du mécanisme de défaillance par glissement). Pour chaque fiche, les données sont respectivement :

- le niveau de la crue (HC = crue atteignant la hauteur de la crête de la digue ; 500 = crue de période de retour 500 ans ; 200 = crue de période de retour de 200 ans), régime d'écoulement = (permanent / transitoire) ;
- le lieu de glissement correspondant au côté de talus (aval/amont) de la digue à évaluer ;
- le résultat de l'analyse déterministe se présentant par le facteur de sécurité FS ;
- La probabilité de défaillance conditionnelle (P_{fc}).

Tableau 8-2. Les variables de calibration probabiliste (P_{fc})

N° fiche	Profil	Crue – régime d'écoulement	Lieu de glissement	FS issu d'analyse déterministe	P_{fc}
31	Digue théorique (25)	HC – régime permanent	Aval	1.303	$2.7\ E-3$
32	Digue théorique (26)	HC – régime transitoire	Aval	1.536	$8.83\ E-7$
33	Digue théorique (27)	HC – régime	Aval	2.239	$6.62\ E-5$

N° fiche	Profil	Crue – régime d'écoulement	Lieu de glissement	FS issu d'analyse déterministe	P_{fc}
		permanent			
34	Digue théorique (28)	HC – régime permanent	Aval	2.46	$1.41\ E-5$
35	Digue théorique (29)	HC – régime permanent	Aval	1.949	$1.46\ E-3$
36	Digue théorique (30)	HC – régime permanent	Aval	2.48	$5.52\ E-6$
37	Digue théorique (31)	HC – régime permanent	Aval	2.056	$1.63\ E-4$
38	Digue théorique (32)	HC – régime permanent	Aval	1.949	$1.68\ E-4$
39	Digue théorique (33)	HC – régime permanent	Aval	1.427	$1\ E-2$
40	Digue théorique (34)	HC – régime permanent	Aval	3.692	$1.32\ E-6$
41	Digue théorique (35)	HC – régime transitoire	Aval	2.717	$5.62\ E-3$
42	Digue théorique (36)	HC – régime permanent	Aval	4.21	$1.32\ E-7$
43	Digue théorique (37)	HC – régime permanent	Aval	2.386	$2.9\ E-4$
44	Digue théorique (38)	HC – régime permanent	Aval	3.903	$4.58\ E-7$
45	Digue théorique (39)	HC – régime permanent	Aval	2.265	$3.98\ E-4$
46	Digue théorique (40)	HC – régime permanent	Aval	3.704	$7.16\ E-7$
47	Digue théorique (41)	HC – régime transitoire	Aval	3.235	$3.69\ E-4$
48	Digue théorique (42)	HC – régime transitoire	Aval	1.654	$2\ E-2$
49	Digue théorique (43)	HC – régime permanent	Aval	1.411	$6.4\ E-2$
50	Digue théorique (44)	HC – régime permanent	Aval	1.687	$0.69\ E-4$
51	Digue théorique (45)	HC – régime permanent	Aval	1.398	$5\ E-2$
52	Digue théorique (46)	HC – régime permanent	Aval	1.552	$1.62\ E-3$
53	Digue théorique (47)	HC – régime permanent	Aval	1.281	$9.6\ E-2$
54	Digue théorique (48)	HC – régime Transitoire	Aval	2.701	$3.22\ E-6$
55	P102	HC – régime permanent	Aval	1.372	$2.8\ E-5$
56	P104	500– régime	Aval	2.404	$4.1\ E-02$

N° fiche	Profil	Crue – régime d'écoulement	Lieu de glissement	FS issu d'analyse déterministe	P_{fc}
		permanent			
57	P108	500– régime permanent	Aval	2.012	$1.3\ E-4$
58	P108	HC – régime permanent	Aval	1.86	$2.89\ E-3$
59	P136	Q500 HC – régime transitoire	Amont	1.424	$0.3\ E-3$
60	P138	500– régime permanent	Aval	1.405	$1.54\ E-2$

Enfin, le Tableau 8-3 présente les fiches des profils de la digue du Drac pour lesquelles nous ne disposons pas de résultats en termes de probabilité de défaillance conditionnelle et pour lesquelles nous souhaitons utiliser le jugement d'expert en vue de leurs attribuer une probabilité de défaillance. Les variables d'intérêt correspondent aux probabilités de défaillance conditionnelles (P_{fc}) vis-à-vis du mécanisme de défaillance par érosion interne. Pour chaque fiche, les données sont respectivement :

- le niveau de la crue (HC = crue atteignant la hauteur de la crête de la digue ; 500 = crue de période de retour 500 ans ; 200 = crue de période de retour de 200 ans), régime d'écoulement = (permanent / transitoire) ;
- le mécanisme de rupture.

Tableau 8-3. Les variables d'intérêt probabiliste (P_{fc})

N° fiche	Profil	Crue – régime d'écoulement	Mécanisme de rupture	P_{fc}
61	P106	HC – régime permanent	érosion interne	-
62	P136	HC – régime permanent	érosion interne	-

Mise en œuvre du questionnement des experts

Pour la constitution du panel d'experts, six ingénieurs ayant une activité liée directement au domaine des digues fluviales et présentant différents niveaux d'expérience (junior, confirmé, senior) ont été identifiés. Afin de conserver l'anonymat des experts, aucune information liée aux évaluations de chacun d'entre eux n'apparaitra dans les élicitations. L'analyse des résultats de chaque expert est identifiée par un numéro spécifique (expert (1), expert (2), …, expert (n)) anonyme.

Lors du premier contact avec chaque expert et avant de leur confier le formulaire, une présentation générale du contexte de la recherche, les objectifs et la démarche d'élicitation leurs ont été présentés. Nous avons particulièrement souligné que nous demandons des estimations des quantiles 5% et 95% correspondant à la fourchette des valeurs possible, ainsi

que l'estimation de la valeur du quantile 50% qui correspond à la valeur la plus vraisemblable (valeur centrale) à laquelle l'expert accorde confiance. Nous avons également souligné que l'estimation des quantiles 5% et 95% permet à l'expert de refléter ses incertitudes liées à son jugement propre de la valeur la plus vraisemblable (quantile 50%)[2].

Lors de la présentation du contexte, aucune distinction entre des variables de calibration et des variables d'intérêt n'a été faite.

On n'a pas fixé de temps limite pour le rendu du formulaire, chaque expert était libre d'y répondre selon sa disponibilité.

8.1.1.2 **Résultats**

Les résultats d'élicitations expertes recueillis dans cette phase sont présentés dans le corps du rapport pour un seul expert et les résultats complets des autres experts sont rassemblés dans l'annexe B. La Figure 8-2 présente les résultats des élicitations de l'expert (1) :

- le graphique de gauche présente les élicitations de l'expert (1) relatives aux facteurs de sécurité (Fs) vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement (variables de calibration). La représentation graphique des valeurs est faite selon une échelle linéaire.

- le graphique de droite représente les élicitations de l'expert (1) relatives aux probabilités de défaillance conditionnelles (P_{fc}) vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement (variables de calibration) et les élicitations relatives aux probabilités de défaillance conditionnelles (P_{fc}) vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne (variables d'intérêt). La représentation graphique des valeurs est faite selon une échelle logarithmique.

Nous précisons pour chaque graphique illustrant les élicitations expertes les points suivants :

- les points rouges correspondent aux vraies valeurs connues déterminées par une analyse quantitative via une modélisation numérique à l'aide du logiciel GeoStudio ;
- les deux lignes vertes pointillées (variable de calibration déterministes) et les deux lignes bleues pointillées (variable d'intérêt probabilistes) représentent les intervalles d'incertitude déterminés par l'expert. Elles correspondent donc aux quantiles 5% et 95% ;
- les lignes vertes et bleues continues représentent les valeurs les plus vraisemblables déterminées par l'expert. Elles correspondent donc au quantile 50%.

[2] En toute rigueur, la valeur la plus vraisemblable ne corresponde pas forcément à la médiane ou quantile 50%, cependant, ce terme est paru plus familier aux experts.

Résultats des élicitations individuelles de l'expert (1)

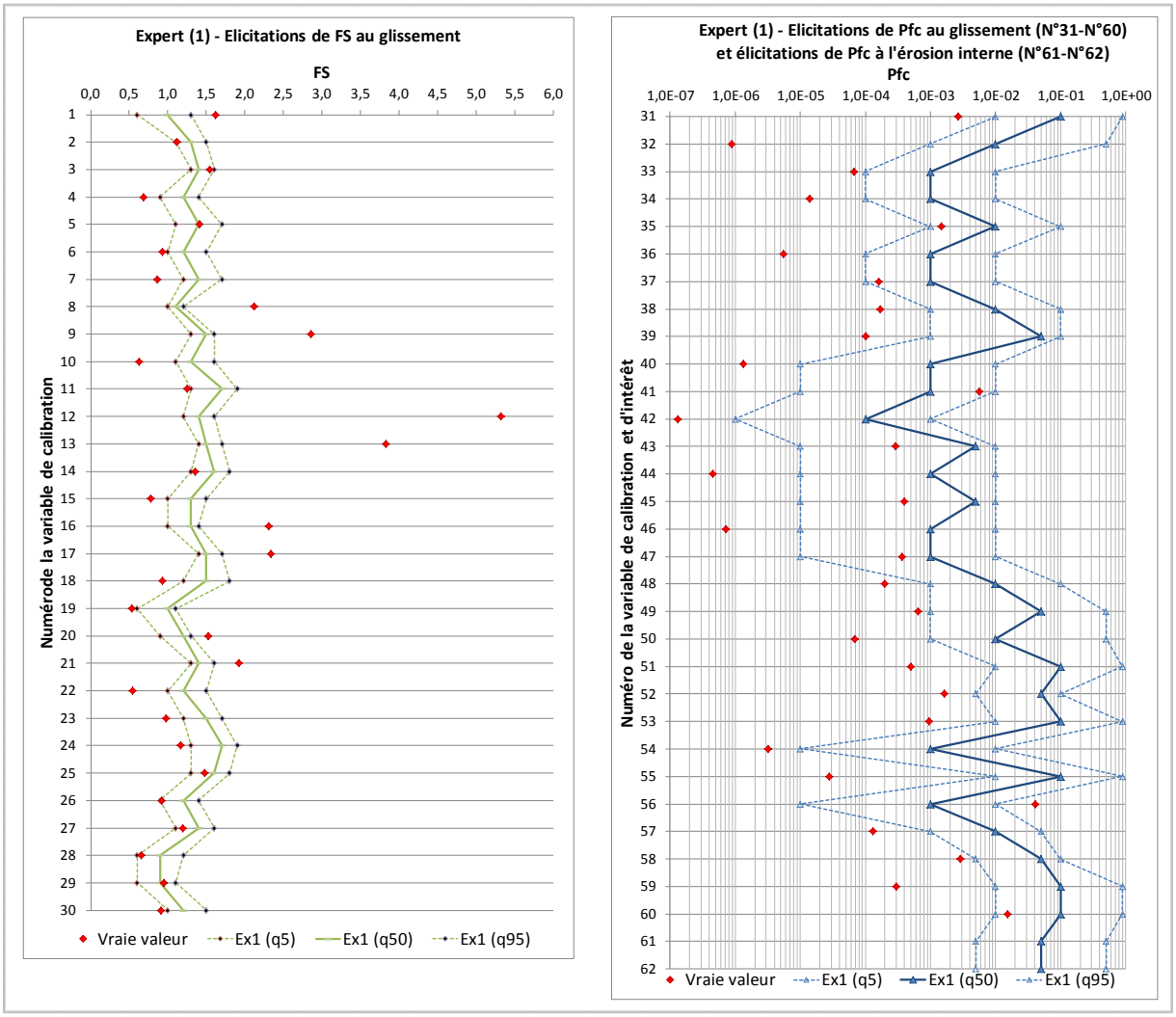


Figure 8-2. Elicitations de l'expert (1), de gauche à droit : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et à l'érosion interne.

NB : les élicitations des quantiles 5%, 50% et 95% sont reliées par des lignes (pointillée ou continues) uniquement pour faciliter leur visualisation (il n'y a pas de lien entre les variables).

8.1.1.3 **Discussions**

Dans cette section, nous analysons les résultats de l'élicitations brutes de l'expert (1) et nous présentons un récapitulatif des élicitations de l'ensemble des experts.

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 40% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 20% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 10% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;

  - 30% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **D'après le graphique de la variable de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 74% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 20% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 3% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
  - 3% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Nous constatons que le pourcentage des vraies valeurs contenues dans l'intervalle d'incertitude [5%, 95%] donné par l'expert (1) est de seulement 30% pour les variables de calibration correspondant au FS et de seulement 23% pour les variables de calibration correspondant à la P_{fc}.

Nous pouvons dire que les élicitations de l'expert (1) sur les variables de calibration (FS) au glissement ont tendance à être sur-confiantes car la majorité (40%) de ces élicitations se concentre dans le premier intervalle d'incertitude [0%, 5%]. L'expert (1) a donné donc des valeurs élevées des variables de calibration (FS) au glissement. Les élicitations de l'experts (1) sur variables de calibration (P_{fc}) au glissement ont tendance à être sous-confiances car la majorité (74%) de ces élicitations se concentre dans le premier intervalle d'incertitude [0, 5%]. L'expert (1) a donné donc des valeurs élevées des variables de calibration (P_{fc}) au glissement.

Dans le Tableau 8-4, nous récapitulons les résultats de l'analyse des élicitations de l'ensemble des experts du panel en présentant le nombre des variables de calibration (n) dans chaque intervalle d'incertitude et le pourcentage associé (%). Nous signalons aussi la tendance des élicitations expertes à la sur-confiance ou à la sous-confiance qui suit la logique suivante :

- Si la concentration des vraies valeurs déterministes de la variable de calibration (FS) se situe dans le 1ère et le 2ème intervalle d'incertitude [0%,5%] et [5%, 50%], cela signifie que l'expert élicite des valeurs élevées de (FS) et par conséquent il est sur-confiant dans ses élicitations. Inversement, il est sous-confiant si la concentration des vraies valeurs se situe dans le 3ème et le 4ème intervalle d'incertitude [50%, 95%] et [95% ,100%], il donne donc des valeurs faibles de facteur de sécurité.
- Si la concentration des vraies valeurs probabilistes de la variable de calibration (P_{fc}) se situe dans le 1ère et le 2ème intervalle d'incertitude [0%,5%] et [5%, 50%], cela signifie que l'expert élicite des valeurs élevées de (P_{fc}) et par conséquent il est sous-confiant dans ses élicitations. Inversement, il est sur-confiant si la concentration des vraies valeurs se situe dans le 3ème et le 4ème intervalle d'incertitude [50%, 95%] et [95% ,100%], il donne donc des valeurs faibles de la probabilité de défaillance.

Tableau 8-4. Tableau récapitulatif d'analyse de la justesse des élicitations expertes du panel pour la phase d'élicitation des avis experts

Expert (1)						
Intervalle d'incertitude		$[0\%, 5\%]$	$[5\%, 50\%]$	$[50\%, 95\%]$	$[95\%, 100\%]$	**Tendance**
(FS)	n	12	6	3	9	Sur-confiance
	%	40%	20%	10%	30%	
$(\mathbf{P_{fc}})$	n	22	6	1	1	Sous-confiance
	%	74%	20%	3%	3%	
Expert (2)						
(FS)	n	19	1	1	9	Sur-confiance
	%	64%	3%	3%	30%	
$(\mathbf{P_{fc}})$	n	25	3	1	1	Sous-confiance
	%	83%	10%	3%	3%	
Expert (3)						
(FS)	n	17	4	2	7	Sur-confiance
	%	57%	13%	7%	23%	
$(\mathbf{P_{fc}})$	n	26	2	0	2	Sous-confiance
	%	86%	7%	0%	7%	
Expert (4)						
(FS)	n	12	9	3	6	Sur-confiance
	%	40%	30%	10%	20%	
$(\mathbf{P_{fc}})$	n	28	2	0	0	Sous-confiance
	%	93%	7%	0%	0%	
Expert (5)						
(FS)	n	17	5	2	6	Sur-confiance
	%	56%	17%	7%	20%	
$(\mathbf{P_{fc}})$	n	0	0	6	24	Sur-confiance
	%	0%	0%	20%	80%	
Expert (6)						
(FS)	n	17	6	5	2	Sur-confiance
	%	56%	20%	17%	7%	
$(\mathbf{P_{fc}})$	n	1	9	12	8	Sur-confiance
	%	3%	30%	40%	27%	

Pour les différentes élicitations expertes, le pourcentage des vraies valeurs contenues dans l'intervalle d'incertitude élicité [5%, 95%] varie de 6 à 40% pour le cas du FS et de 7 à 70%

pour les variables de calibration correspondant à la P_{fc}. Le tableau montre également que tous les experts ont une tendance à la sur-confiance dans les élicitations du FS au glissement et une tendance à la sous-confiance dans les élicitations de la P_{fc} au glissement.

Discussion sur la phase de questionnement des experts

Lors du premier contact avec les experts, la majorité d'entre eux ont posé la question suivante : *qui sont les experts qui participent à l'application de cette recherche ?* Ici l'expert(s) est inquiet(nt) que son (leur) jugement(s) soit comparé aux autres experts.

Dans une autre situation, un autre expert nous a fait un retour critique en expliquant qu'une *fois connues la géométrie, la nature des matériaux et la perméabilité, la cohésion et l'angle de frottement d'un profil d'une digue, autant faire réaliser le calcul numérique pour déterminer le facteur de sécurité (FS). De ce fait nous n'aurons pas besoin d'un jugement expert pour calculer un (FS) d'un profil d'une digue*. Ici, l'expert est inquiet que son jugement soit comparé directement à un résultat numérique.

Ces deux situations montrent la présence du « biais motivationnels » qui a amené des experts à refuser de répondre au formulaire.

Concernant l'élicitation de la probabilité de défaillance (P_{fc}) vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement, certains experts l'ont évaluée par rapport aux facteurs de sécurité donnés. Si le facteur de sécurité est élevé, l'expert attribue une probabilité faible de défaillance et vice-versa. Cette façon de procéder montre la présence du « biais d'ancrage » : l'expert se laisse influencer par une première évaluation du risque de glissement basée sur une analyse déterministe représenté par le facteur de sécurité (FS) puis il essaye d'ajuster son évaluation de la probabilité de défaillance (P_{fc}) par rapport au résultat de l'évaluation du facteur de sécurité.

Plusieurs experts, pour pouvoir s'inspirer des cas réels, ont souhaité avoir dans le formulaire quelques cas de digues réels pour lesquels l'évaluation de la fiabilité structurelle vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement est déjà faite. Selon eux, cela contribue à faciliter les réponses aux questions posées dans le formulaire. Cette demande illustre la présence du « biais de représentation » : l'expert estime la probabilité d'un événement en se basant sur la probabilité d'un autre événement qui lui est associé ou qui lui est similaire.

De façon générale, la majorité des experts ont montré une motivation élevée pour participer à cette étude et ont présenté une attention remarquable pour comprendre la méthodologie développée dans cette recherche et la possibilité d'être appliquée dans leurs propres travaux.

8.1.1.4 **Conclusions**

Les principales conclusions de la phase d'élicitation de l'approche « EiCAD » sont les suivantes :

1. La phase d'élicitation permet d'avoir une distribution des avis experts incertains vis-à-vis de tous les mécanismes de rupture de digue. Une distribution probabiliste donnée sous forme d'un intervalle d'incertitude et d'une valeur centrale- plus vraisemblable via les quantiles 5%, 50% et 95%.
2. Les élicitations expertes faites sous forme d'intervalles d'incertitude permettent d'identifier en premier ordre la tendance des élicitations expertes à la sur-confiance ou à la sous-confiance.
3. Le formulaire proposé et développé par nos soins, repose sur un protocole complet d'élicitation des avis experts incertains, ce qui lui permet d'être adapté et appliqué dans plusieurs domaines de génie civil où le recours au jugement expert est la seule source pour l'obtention d'informations exploitables dans un contexte incertain. En Effet, la démarche appliquée aux digues peut être étendue à d'autres ouvrages avec des ajustements spécifiques à chaque catégorie d'ouvrages de génie civil.

8.1.2 Phase de calibration

8.1.2.1 **Application**

La phase suivante de l'approche est la phase de « **C**alibration » des avis experts. Dans cette phase, le modèle de calibration classique de Cooke (1991) est appliqué dans le but d'attribuer un poids de calibration aux élicitations expertes en vue de les combiner. Le poids de calibration se détermine mathématiquement par le score de calibration (évaluation de la justesse des élicitations) et le score d'entropie (évaluation de la précision des élicitations).

Nous appliquons cette phase de calibration selon les trois modalités d'application différenciées selon les variables de calibration utilisées :

- 1ère modalité : les facteurs de sécurité au glissement (FS) et les probabilités de défaillance au glissement (P_{fc}) sont les variables de calibration ;
- 2ème modalité : les facteurs de sécurité au glissement (FS) sont les variables de calibration ;
- 3ème modalité : les probabilités de défaillance au glissement (P_{fc}) sont les variables de calibration.

8.1.2.2 **Résultats**

Résultat de la phase de calibration des avis experts selon la 1ère modalité d'application

Le Tableau 8-5 présente les résultats issus de la mise en œuvre de la phase de calibration selon la 1ère modalité d'application dont les variables de calibration sont les facteurs de sécurité (Fs) et les probabilités de défaillance (P_{fc}) vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement.

Tableau 8-5. Résultats de la phase de calibration selon la 1ère modalité d'application d'« EiCAD »

	Modalité (1) - (VC = FS + P_{fc})			
	Score de calibration	Score d'entropie	Poids de calibration individuel	Poids de calibration relatif
N° expert	C_e	K_e	w_e	w'_e
1	1,8E-10	1,07	1,9E-10	5,72E-10
2	0,0E+00	**1,37**	0,0E+00	0,00E+00
3	0,0E+00	1,24	0,0E+00	0,00E+00
4	1,5E-14	1,48	2,2E-14	6,94E-14
5	2,3E-11	0,83	1,9E-11	5,98E-11
6	**6,2E-01**	0,51	**3,1E-01**	**0,99E+00**
			Somme	1,00

Les valeurs du score de calibration varient de 0 à 0,62, dont la valeur la plus élevée est obtenue par l'expert (6). Concernant le score d'entropie, les valeurs varient de 0,51 à 1,37, dont la valeur la plus élevée est obtenue par l'expert (2). Ces résultats conduisent à des poids de calibration variant de 0 à 0,99, où la valeur la plus élevée a été obtenue par l'expert (6).

Les résultats montrent les éléments suivants pour l'expert (6) :

- l'avis de l'expert (6) a le score de calibration (évaluation de la justesse des élicitations) le plus élevé ($C_6 = 6.2E-1$). Cela signifie que la majorité des vraies valeurs des variables de calibration se trouve dans les intervalles d'incertitude qu'il a élicités (32 sur 60 élicitations du FS et de P_{fc}) ;
- l'avis de l'expert (6) a le score d'entropie (évaluation de la précision des intervalles d'incertitude élicités) le plus faible ($K_6 = 0.51$). Cela signifie que ses intervalles d'incertitude élicités sont globalement plus larges que ceux donnés par les autres experts ;
- l'avis de l'expert (6) a le meilleur poids de calibration du panel ($W_6 = 0.99$).

Les résultats montrent les éléments suivants pour l'expert (2) :

- l'avis de l'expert (2) a un score de calibration (évaluation de la justesse des élicitations) nul ($C_2 = 0$). Cela signifie que les vraies valeurs des variables de calibration sont majoritairement en dehors des intervalles d'incertitude qu'il a élicités ;
- l'avis de l'expert (2) a un score d'entropie (évaluation de la précision des intervalles d'incertitude élicités) bon ($K_2 = 1.37$). Cela signifie que ses intervalles d'incertitude élicités sont globalement plus étroits que ceux donnés par les autres experts ;
- l'avis de l'expert (2) a le plus mauvais poids de calibration du panel ($W_2 = 0$).

Résultat de la phase de calibration des avis experts selon la 2ème modalité d'application

Le Tableau 8-6 présente les résultats issus de la mise en œuvre de la phase de calibration selon la 2ème modalité d'application dont les variables de calibration sont les facteurs de sécurité (FS) vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement.

Tableau 8-6. Résultats de la phase de calibration selon la 2ème modalité d'application d'« EiCAD »

	Modalité (2) - (VC = FS)			
	Score de calibration	Score d'entropie	Poids de calibration individuel	Poids de calibration relatif
N° expert	C_e	K_e	w_e	w'_e
1	2,3E-04	1,12	2,6E-04	2,67E-02
2	9,5E-13	**1,26**	1,2E-12	1,25E-10
3	1,1E-07	0,72	8,2E-08	8,63E-06
4	**8,6E-03**	1,08	**9,2E-03**	**9,7E-01**
5	2,5E-11	0,83	1,9E-11	1,95E-09
6	1,9E-04	0,44	8,3E-05	8,72E-03
			Somme	1,00

Les valeurs du score de calibration varient de 0 à 0,0.008, dont la valeur la plus élevée est obtenue par l'expert (4). Concernant le score d'entropie, les valeurs varient de 0,44 à 1,26, dont la valeur la plus élevée est obtenue par l'expert (2). Ces résultats conduisent à des poids de calibration variant de 0 à 0,97, où la valeur la plus élevée a été obtenue par l'expert (4).

Les résultats montrent les éléments suivants pour l'expert (4) :

- l'avis de l'expert (4) a le score de calibration (évaluation de la justesse des élicitations) le plus élevé ($C_4 = 8.6\,E-03$). Il présente 40% des vraies valeurs des variables de calibration dans les intervalles d'incertitude qu'il a élicités (12 sur 30 élicitations du FS) ;
- l'avis de l'expert (4) a un score d'entropie (évaluation de la précision des intervalles d'incertitude élicités) bon ($K_4 = 1.08$). Cela signifie que ses intervalles d'incertitude élicités sont globalement étroits que ceux donnés par les autres experts ;
- l'avis de l'expert (4) a le meilleur poids de calibration du panel ($W_4 = 0.97$).

Les résultats montrent les éléments suivants pour l'expert (2) :

- l'avis de l'expert (2) a un score de calibration (évaluation de la justesse des élicitations) très faible ($C_2 = 9{,}5\,E-13$). Cela signifie que les vraies valeurs des variables de calibration sont majoritairement en dehors des intervalles d'incertitude qu'il a élicités ;
- l'avis de l'expert (2) a le meilleur score d'entropie (évaluation de la précision des intervalles d'incertitude élicités) ($K_2 = 1.26$). Cela signifie que ses intervalles d'incertitude élicités sont globalement plus étroits que ceux donnés par les autres experts ;
- l'avis de l'expert (2) a le faible poids de calibration ($W_2 = 1.25\,E-10$).

Résultat de la phase de calibration des avis experts selon la 3ème modalité d'application

Le Tableau 8-7 présente les résultats issus de la mise en œuvre de la phase de calibration selon la 3ème modalité d'application dont les variables de calibration sont les probabilités de défaillance (P_{fc}) vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement.

Tableau 8-7. Résultats de la phase de calibration selon la 3ème modalité d'application d'« EiCAD »

	Modalité (3) - (P_{fc})			
	Score de calibration	Score d'entropie	Poids de calibration individuel	Poids de calibration relatif
N° expert	C_e	K_e	w_e	w'_e
1	4,0E-10	1,02	4,1E-10	7,29E-10
2	5,4E-14	1,48	8,0E-14	1,42E-13
3	0,0E+00	1,76	0,0E+00	0,00E+00
4	0,0E+00	**1,88**	0,0E+00	0,00E+00
5	1,3E-13	0,81	1,1E-13	1,09E-13
6	**9,8E-01**	0,57	**5,6E-01**	**0,99E+00**
			Somme	1,00

Les valeurs du score de calibration varient de 0 à 0,98, dont la valeur la plus élevée est obtenue par l'expert (6). Concernant le score d'entropie, les valeurs varient de 0,57 à 1,88,

dont la valeur la plus élevée est obtenue par l'expert (4). Ces résultats conduisent à des poids de calibration variant de 0 à 0,99, où la valeur la plus élevée a été obtenue par l'expert (6).

Les résultats montrent les éléments suivants pour l'expert (6):

- l'avis de l'expert (6) a le score de calibration (évaluation de la justesse des élicitations) le plus élevé ($C_6 = 9.8E-1$). Il présente 70% des vraies valeurs des variables de calibration dans les intervalles d'incertitude qu'il a élicités (21 sur 30 élicitations de P_{fc}) ;
- l'avis de l'expert (6) a le score d'entropie (évaluation de la précision des intervalles d'incertitude élicités) le plus faible ($K_6 = 0.57$). Cela signifie que ses intervalles d'incertitude élicités sont globalement plus larges que ceux donnés par les autres experts ;
- l'avis de l'expert (6) a le meilleur poids de calibration du panel ($W_6 = 0.99$).

Les résultats montrent les éléments suivants pour l'expert (4) ;

- l'avis de l'expert (4) a un score de calibration (évaluation de la justesse des élicitations) nul ($C_4 = 0$). Cela signifie que les vraies valeurs des variables de calibration sont majoritairement en dehors des intervalles d'incertitude qu'il a élicités ;
- l'avis de l'expert (4) a le score d'entropie (évaluation de la précision des intervalles d'incertitude élicités) le plus élevé ($K_4 = 1.88$). Cela signifie que ses intervalles d'incertitude élicités sont globalement plus étroits que ceux donnés par les autres experts ;
- l'avis de l'expert (4) a un poids de calibration nul ($W_4 = 0$).

8.1.2.3 **Discussions**

D'après les résultats de l'application des trois modalités, nous remarquons que le score de calibration a une influence significative sur le résultat final de la phase de calibration des avis experts tandis que le score d'entropie a une influence limitée. Dans notre cas, les résultats des trois modalités montrent que :

- plusieurs experts fournissent des intervalles d'incertitude étroits / précis mais ne contiennent pas les vraies valeurs, ce qui induit un score d'entropie élevé et un score de calibration faible voire nul ;
- inversement certains experts fournissent des intervalles d'incertitude moins-précis (larges) et contenant les vraies valeurs de variables de calibration, ce qui induit un score d'entropie faible et un score de calibration élevé ;
- dans notre application, le score de calibration apparait plus pénalisant que le score d'entropie. Ainsi, un expert qui souhaiterait obtenir un score global plus élevé aurait intérêt à donner des intervalles d'incertitude plus larges ;
- les résultats de la calibration des avis experts varient selon les variables de calibration utilisées pour la mise en œuvre de la phase de la calibration :
    - l'expert (4) donne des meilleurs estimations de la variable de calibration FS, il a donc eu un poids de calibration plus élevé dans la 2ème modalité ;

- l'expert (6) donne des meilleures estimations de la variable de calibration P_{fc}, il a donc eu un poids de calibration plus élevé dans la 3ème modalité.

8.1.2.4 **Conclusions**

Les principales conclusions de la phase de calibration de l'approche « EiCAD » sont les suivantes :

1. La calibration des avis experts permet d'évaluer la justesse des élicitations (score de calibration) et la quantité d'information des élicitations (score d'entropie). Le poids final de la calibration permet d'attribuer un ordre aux avis des experts questionnés.
2. La calibration des avis experts ne permet pas d'effectuer de corrections des biais sur les avis experts élicités individuellement, elle permet d'obtenir seulement une version agrégée et pondérée des avis experts.
3. La calibration des avis experts via le score d'entropie met en évidence les tendances à la sur-confiance (intervalle d'incertitude précis conduit à un score d'entropie élevé) ou à la sous-confiance (intervalle d'incertitude large conduit à un score d'entropie bas) entachant les avis experts.
4. La calibration des avis experts est une phase sensible au type de variables de calibration utilisé pour sa mise en œuvre.
5. Le score de calibration (évaluation de la justesse des élicitations expertes) a une influence significative sur le résultat final de la calibration des avis experts tandis que le score d'entropie a une influence mineure sur le résultat final de la calibration.

8.1.3 Phase d'agrégation

8.1.3.1 **Application**

La phase suivante de l'approche est la phase d'« **A**grégation » des avis experts. L'objectif de cette phase est d'agréger, par le poids de calibration, toutes les élicitations expertes. On obtient ainsi une seule élicitation qui se présente par une distribution probabiliste sous forme d'un intervalle d'incertitude et d'une valeur centrale (valeur la plus vraisemblable).

Nous appliquons cette phase d'agrégation selon les trois modalités d'application différenciées selon les variables de calibration utilisées :

- 1ère modalité : les facteurs de sécurité au glissement (FS) et les probabilités de défaillance au glissement (P_{fc}) sont les variables de calibration ;
- 2ème modalité : les facteurs de sécurité au glissement (FS) sont les variables de calibration ;
- 3ème modalité : les probabilités de défaillance au glissement (P_{fc}) sont les variables de calibration.

Nous présentons dans la section suivante les distributions calibrées et agrégées de toutes les élicitations expertes que nous les nommons « les distributions probabilistes du panel d'experts » et nous discutons ensuite des résultats obtenus.

8.1.3.2 **Résultats et discussions**

Résultats d'agrégation des avis experts calibrés et agrégés selon la 1ère modalité d'application

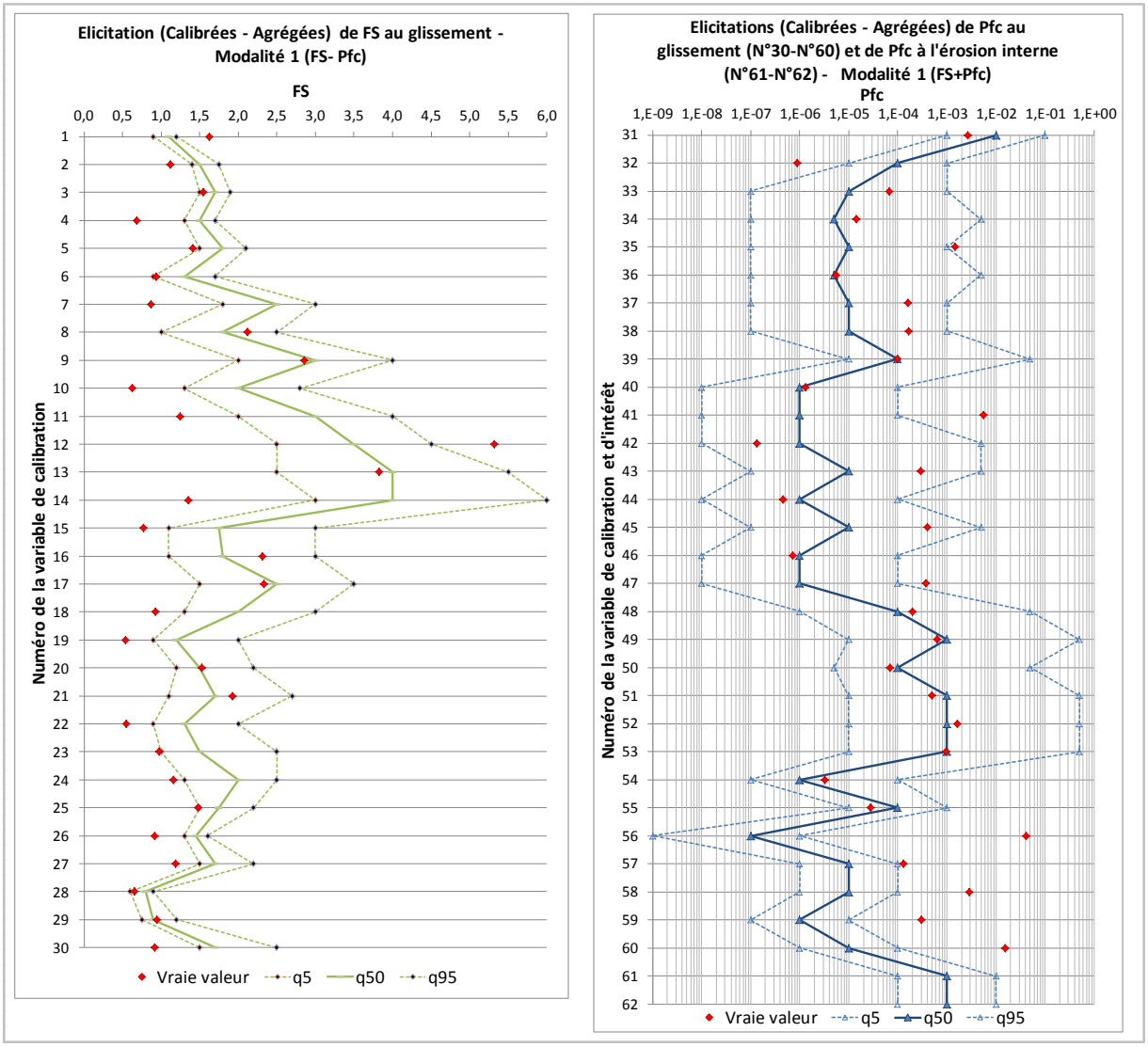


Figure 8-3. Distributions agrégées des avis experts calibrés selon la 1ère modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
    - 56.7% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
    - 20% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
    - 16.7% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
    - 6.7% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].

- **D'après le graphique de la variable de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
    - 3.3% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
    - 36.7% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
    - 36.7% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
    - 23.3% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Nous pouvons dire que les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (FS) au glissement ont une tendance à la sur-confiance, car la majorité (56.7%) des variables de calibration se concentre dans le premier intervalle d'incertitude [0%, 5%]. Ce panel d'experts a donc donné des valeurs élevées de la variable de calibration (FS) au glissement. Les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (P_{fc}) au glissement ont aussi une tendance à la sur-confiance, car la majorité (60%) des variables de calibration se concentre dans les deux derniers intervalles d'incertitude [50, 95%] et [95%, 100%]. Ce panel d'experts a donc donné des valeurs faibles de la variable de calibration (P_{fc}) au glissement.

Résultat d'agrégation des avis experts calibrés et agrégés selon la 2ème modalité d'application

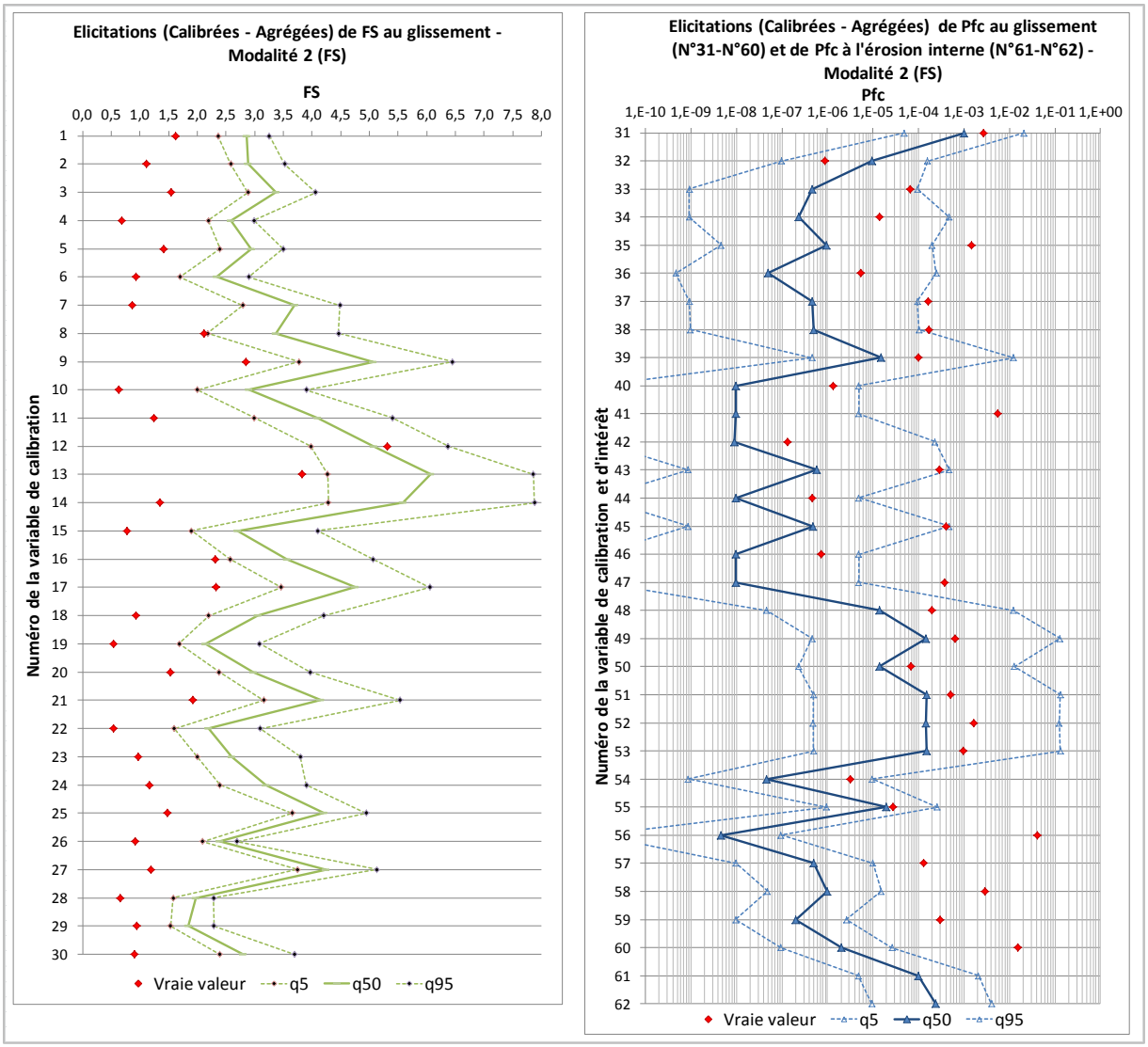


Figure 8-4. Distributions agrégées des avis experts calibrés selon la 2ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs)

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 96.7% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 3.3% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **D'après le graphique de la variable de calibration (P_{fc}) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :

- 0% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
- 6.7% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
- 63.3% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
- 30% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].

- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Nous pouvons dire que les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (FS) au glissement ont une tendance à la sur-confiance, car la majorité (96.7%) des variables de calibration se concentre dans le premier intervalle d'incertitude [0%, 5%]. Ce panel d'experts a donc donné des valeurs élevées de la variable de calibration (FS) au glissement. Les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (P_{fc}) au glissement ont aussi une tendance à la sur-confiance, car la majorité (83.3%) des variables de calibration se concentre dans les deux derniers intervalles d'incertitude [50, 95%] et [95%, 100%]. Ce panel d'experts a donc donné des valeurs faibles de la (P_{fc}) au glissement.

Résultat d'agrégation des avis experts calibrés et agrégés selon la 3ème modalité d'application

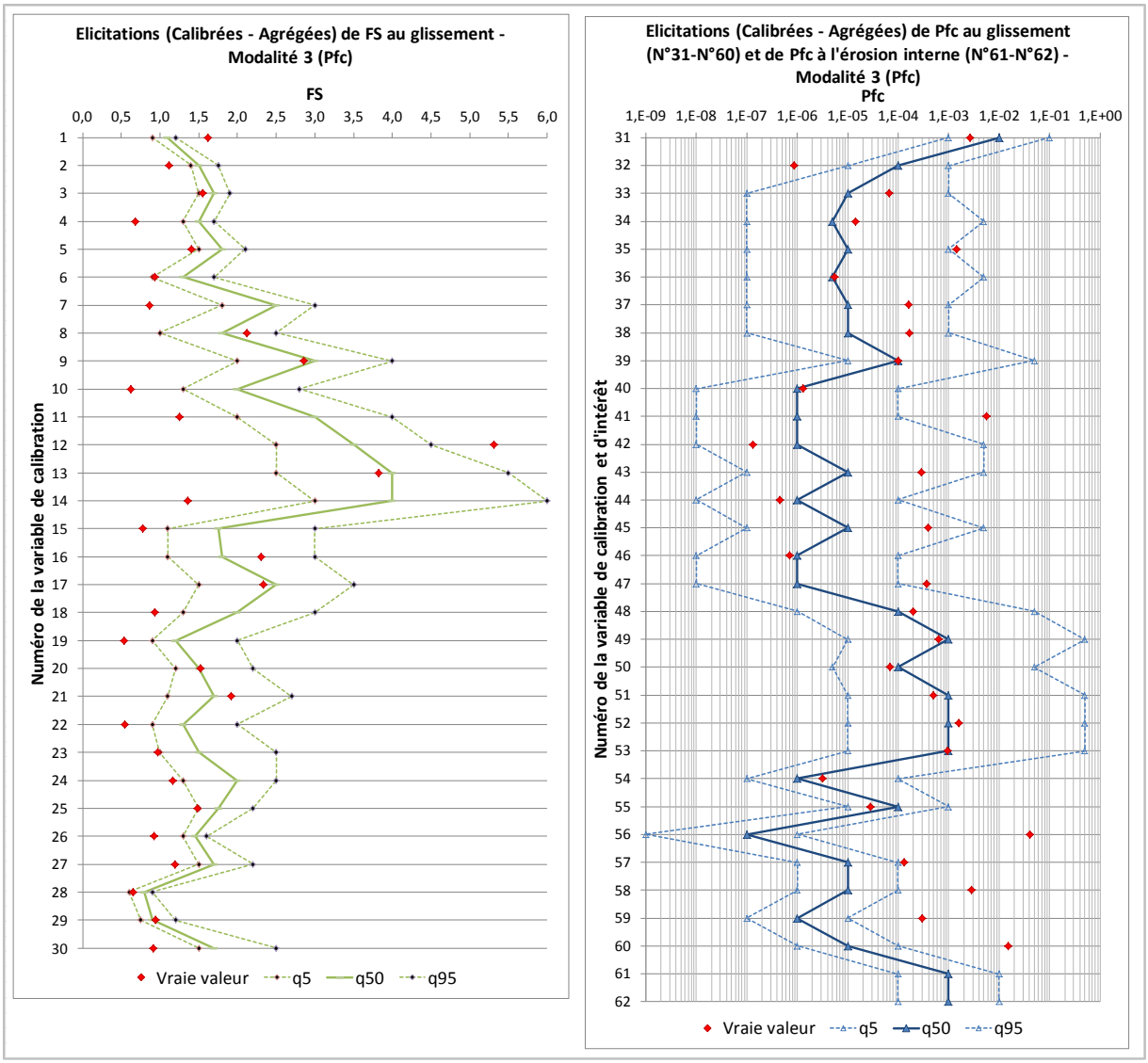


Figure 8-5. Distributions agrégées des avis experts calibrés selon la 3ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (P_{fc})

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 56.7% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 20% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 16.7% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
  - 6.7% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **D'après le graphique de la variable de calibration (P_{fc}) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :

- 3.3% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
- 36.7% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
- 36.7% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
- 23.3% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].

- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Nous pouvons dire que les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (FS) au glissement à une tendance à la sur-confiance car, la majorité (56.7%) des variables de calibration se concentre dans le premier intervalle d'incertitude [0%, 5%]. Ce panel d'experts a donc donné des valeurs élevées de la variable de calibration (FS) au glissement. Les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (P_{fc}) au glissement ont aussi une tendance à la sur-confiance, car la majorité (60%) des variables de calibration se concentre dans les deux derniers intervalles d'incertitude [50%, 95%] et [95%, 100%]. Ce panel d'experts a donc donné des valeurs faibles de la variable de calibration (P_{fc}) au glissement.

8.1.3.3 **Conclusions**

Les principales conclusions de la phase d'agrégation de l'approche « EiCAD » sont les suivantes :

1. La phase d'agrégation permet de rassembler mathématiquement les avis experts calibrés sous forme probabiliste identique à la forme initiale de la phase d'élicitation (un intervalle d'incertitude et une valeur plus vraisemblable). Ce qui correspond bien à nos attentes puisque cela permet de conserver l'incertitude qui pèse sur les résultats de l'expert (contrairement à l'agrégation de Cooke qui ne donne qu'une valeur unique) ;
2. Les poids de calibration conduisent lors de la phase d'agrégation à retenir pratiquement les avis experts ayant eu les poids de calibration les plus élevés.
3. La phase d'agrégation est une phase transitoire entre la phase de calibration et celle de dé-biaisage des avis experts et ne contribue pas au traitement explicite des biais experts, puisqu'elle se fait que pondérer les élicitations expertes les unes par rapport aux autres.

8.1.4 Phase de dé-biaisage

8.1.4.1 **Application**

La phase suivante de l'approche est la phase de « **D**é-biaisage » des avis experts. Dans cette phase nous proposons une adaptation du modèle de de dé-biaisage des avis experts de Clemen et Lichtendahl (2002). En pratique, notre proposition d'adaptation de ce modèle consiste à évaluer par « calcul itératif » les coefficients de correction permettant de dé-biaiser les avis experts.

Comme l'élicitation des avis experts a été effectuée selon les quantiles 5%, 50% et 95%, le calcul itératif des coefficients de correction est effectué jusqu'à obtenir que les valeurs connues (de la variable de calibration) se trouvent respectivement :

- dans son 1er intervalle interquantile [0%, 5%] dans 5% des cas ;
- dans son 2ème intervalle interquantile [5%, 50%] dans 45% des cas ;
- dans son 3ème intervalle interquantile [50%, 95%] dans 45% des cas ;
- dans son 4ère intervalle interquantile [95%, 100%] dans 5% des cas.

Pour cela, nous déterminons d'abord le coefficient β par calcul itératif jusqu'à obtenir 50% des vraies valeurs de chaque côté du quantile 50% dé-biaisé. Ensuite, nous déterminons successivement les coefficients α_L et α_U par calcul itératif jusqu'à obtenir 5% des vraies valeurs de chaque côté de l'intervalle interquantile [5%, 95%] dé-biaisé.

Dans la continuation de l'application de l'approche « EiCAD » sur le cas d'étude nous appliquons la phase de dé-biaisage des avis experts pour chacune des trois modalités d'application différenciées selon les variables de calibration utilisées :

- 1ère modalité : les facteurs de sécurité au glissement (FS) et les probabilités de défaillance au glissement (P_{fc}) sont les variables de calibration ;
- 2ème modalité : les facteurs de sécurité au glissement (FS) sont les variables de calibration ;
- 3ème modalité : les probabilités de défaillance au glissement (P_{fc}) sont les variables de calibration.

Nous présentons dans la suite les résultats des distributions probabilistes dé-biaisées et nous discutons ensuite des résultats obtenus.

8.1.4.2 **Résultats et discussions**

Résultats de dé-biaisage des avis experts calibrés et agrégés selon la 1ère modalité d'application

En appliquant la démarche présentée dans la partie II (Démarches pour le dé-biaisage du jugement d'expert pour les digues), nous obtenons par calcul itératif les coefficients de correction suivants :

- coefficient β = 1.09 (pour corriger le quantile $q_{50\%}$) ;
- coefficient α_L = 4.44 (pour corriger le quantile $q_{5\%}$) ;
- coefficient α_U = 3.31 (pour corriger le quantile $q_{95\%}$).

Nous formulons les commentaires suivants :

- Le coefficient de correction ($\beta = 1.09$) reflète que le panel d'experts a tendance à minorer ses estimations relatives aux variables centrales les plus vraisemblables (R_i). En d'autres termes, il faut appliquer un coefficient β sur les valeurs centrales issues de la phase d'agrégation pour retrouver la valeur du quantile 50% de la variable de calibration ;
- Le coefficient de correction ($\alpha_L = 4.44$) reflète que les distances estimées entre (L_i) et (R_i) issues de la phase d'agrégation tendent à être inférieures à celles qu'elles devraient être. En d'autres termes, il faut appliquer un coefficient α_L sur les distances entre (L_i) et (R_i) issues de la phase d'agrégation pour retrouver la distance dé-biaisée entre le quantile 5% et le quantile 50%.
- Le coefficient de correction ($\alpha_U = 3.31$) reflète que les distances estimées entre (R_i) et (U_i) issues de la phase d'agrégation tendent à être inférieures à celles qu'elles devraient être. En d'autres termes, il faut appliquer un coefficient α_U sur les distances entre (R_i) et (U_i) issues de la phase d'agrégation pour retrouver la distance dé-biaisée entre le quantile 50% et le quantile 95%.

En appliquant ces coefficients de correction sur les avis résultant de la phase d'agrégation, nous obtenons les avis dé-biaisés représentés par les graphiques suivantes :

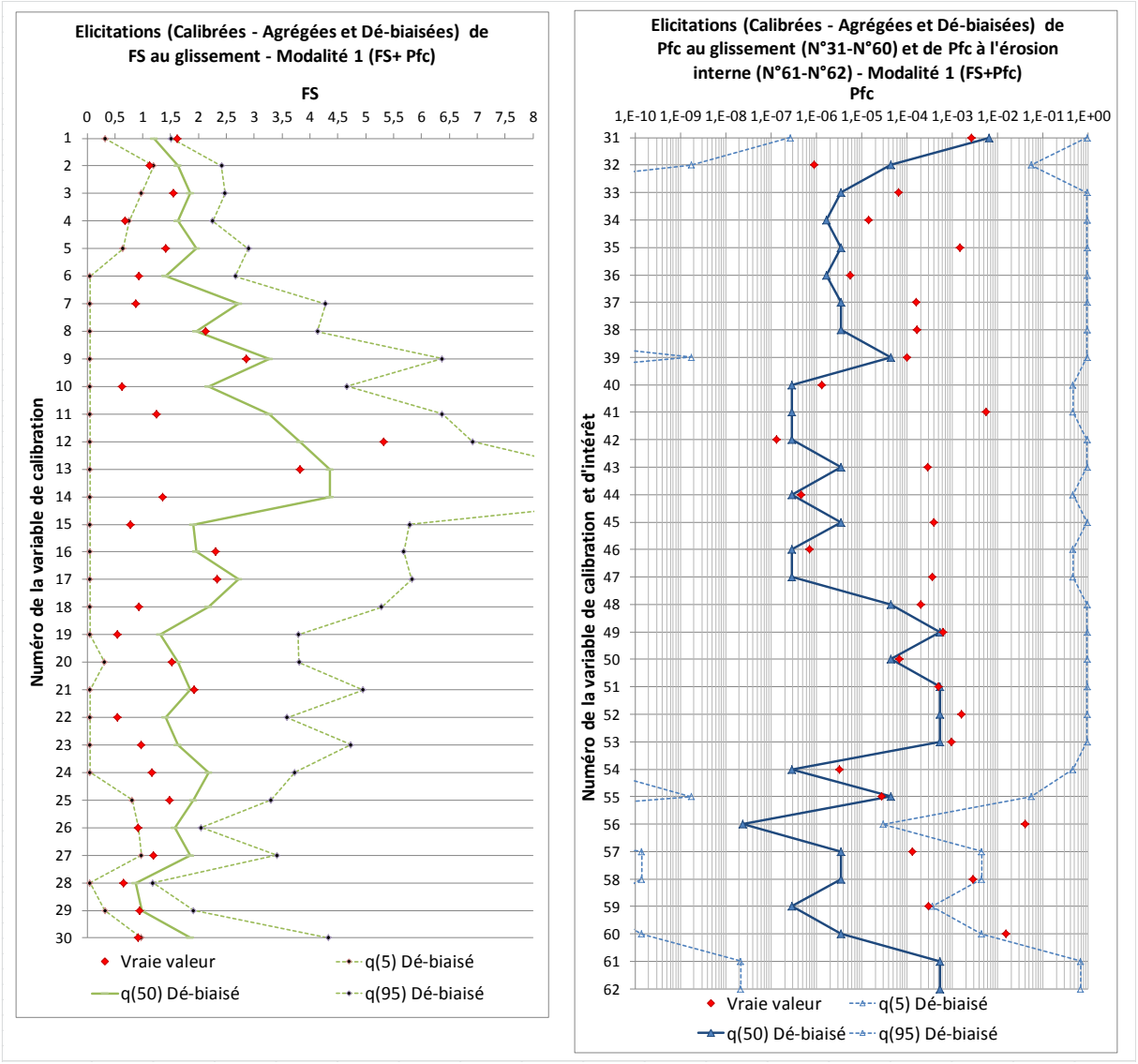


Figure 8-6. Distributions dé-biaisées des avis experts agrégés et calibrés selon la 1ère modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Sur les graphiques des variables de calibration (FS) et (P_{fc}) (Figure 8-6) montrent que les nouveaux intervalles d'incertitude sont devenus plus larges et contiennent la majorité des vraies valeurs de calibration. Pour les variables déterministes (FS au glissement), nous remarquons une concentration des vraies valeurs dans le l'intervalle d'incertitude [5%, 50%], traduisant une tendance à surestimer la valeur centrale de la variable de calibration FS. Pour les variables probabilistes (P_{fc} au glissement), nous remarquons une concentration des vraies valeurs de calibration dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] traduisant une tendance à sous-estimer la valeur centrale de (P_{fc}) au glissement.

Pour pouvoir évaluer la qualité du résultat de la phase de dé-biaisage, nous procédons au calcul des probabilités des intervalles interquantiles avant dé-biaisage des variables de calibration (distributions calibrées et agrégées) et après dé-biaisage (distributions calibrées, agrégées et dé-biaisées), puis nous comparons ces résultats aux valeurs cibles (5%, 45%, 45%, et 5%). Le graphique suivant (Figure 8-7) illustre cette comparaison pour la 1ère modalité

d'application dont les variables de calibration sont les variables de calibration déterministes (FS) et probabilistes (P_{fc}). Nous remarquons l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'avoir une nouvelle distribution probabiliste et pour laquelle les probabilités des intervalles interquantiles correspondent aux valeurs cibles (5% ; 45% ; 45% et 5%).

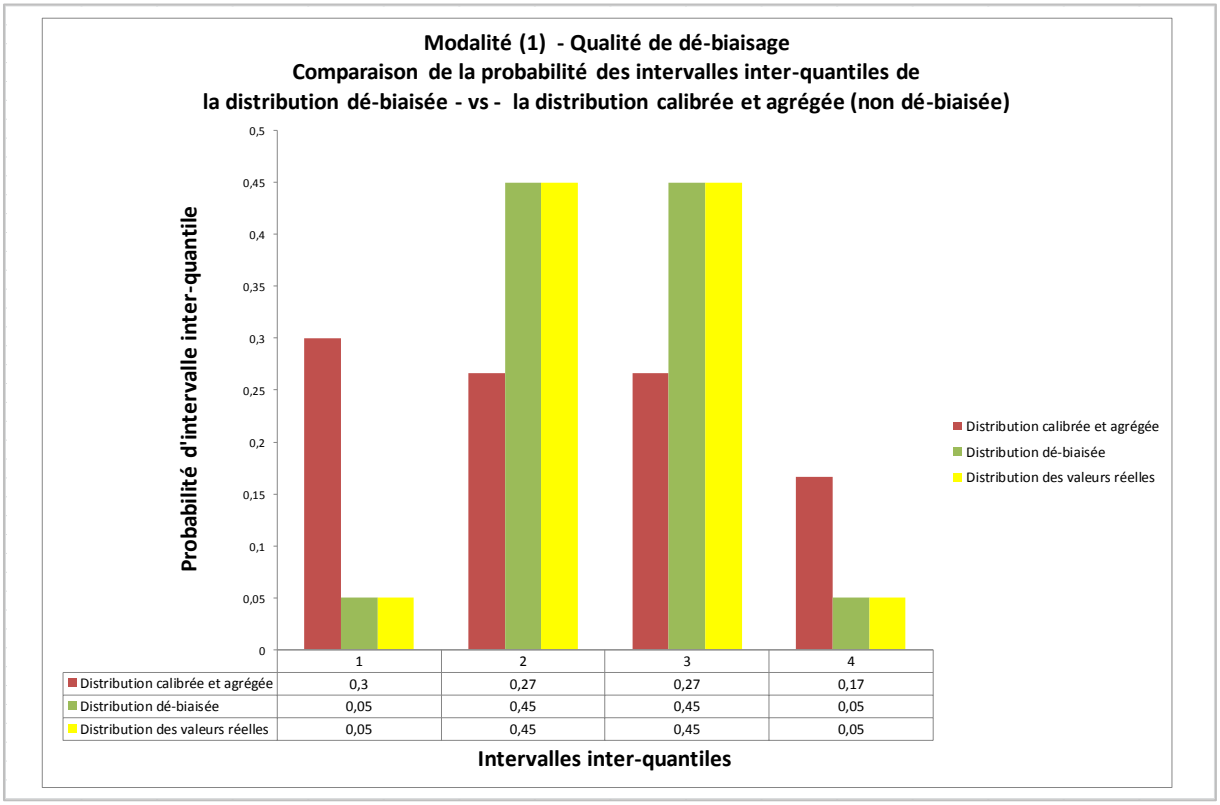


Figure 8-7. Qualité de dé-biaisage présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution calibrée et agrégée selon la 1ère modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Malgré le fait que le calcul itératif conduit à obtenir une distribution dé-biaisée de l'ensemble des variables de calibration (FS et P_{fc} pour la 1ère modalité), c'est-à-dire, avec des probabilités interquantiles correspondant aux valeurs cibles 5%, 45%, 45%, 5% (cf. figure ci-dessus), le résultat obtenu n'apparait pas entièrement satisfaisant car :

- Les intervalles d'incertitude obtenus sont très larges ;
- La majorité des vraies valeurs de variable de calibration FS au glissement se concentrent « à gauche » du quantile 50% ;
- La majorité des vraies valeurs de variable de calibration P_{fc} au glissement se concentrent « à droite » du quantile 50%.

Résultats de dé-biaisage des avis experts calibrés et agrégés selon la 2ème modalité d'application

En appliquant la démarche présentée dans la partie II (Démarches pour le dé-biaisage du jugement d'expert pour les digues), nous obtenons par calcul itératif les valeurs des coefficients de correction suivantes :

- coefficient β = 0.38 (pour corriger le quantile $q_{50\%}$) ;
- coefficient α_L = 1 (pour corriger le quantile $q_{5\%}$) ;
- coefficient α_U = 1.12 (pour corriger le quantile $q_{95\%}$).

Nous formulons les commentaires suivants :

- Le coefficient de correction ($\beta = 0.38$) reflète que le panel d'experts a tendance à majorer ses estimations concernant les valeurs centrales les plus vraisemblables (R_i). En d'autres termes, il faut appliquer un coefficient β sur les valeurs centrales issues de la phase d'agrégation pour retrouver la valeur du quantile 50% de la variable de calibration ;
- Le coefficient de correction $\alpha_L = 1$ reflète que les distances estimées entre (L_i) et (R_i) est en état bien estimées par le panel d'experts et qu'il n'est pas nécessaire de les corriger ;
- Le coefficient de correction ($\alpha_U = 1.12$) reflète que les distances estimées entre (R_i) et (U_i) tendent à être inférieurs à celles qu'elles devraient être. En d'autres termes, il faut appliquer un coefficient α_U sur les distances entre (R_i) et (U_i) issues de la phase d'agrégation pour retrouver la distance dé-biaisée entre le quantile 50% et le quantile 95%.

En appliquant ces coefficients de correction sur les avis résultant de la phase d'agrégation, nous obtenons les avis dé-biaisés représentés par les graphiques suivantes :

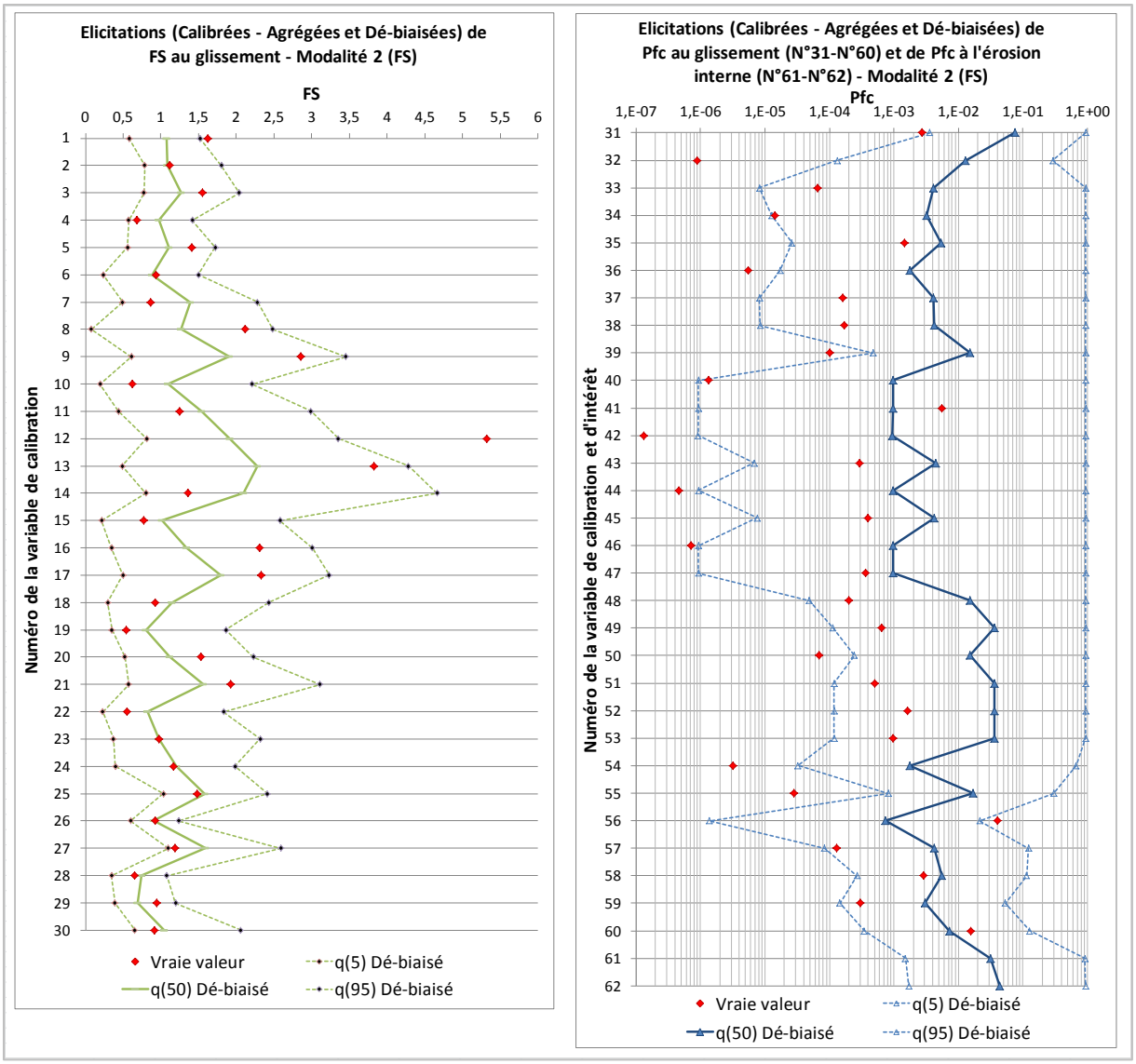
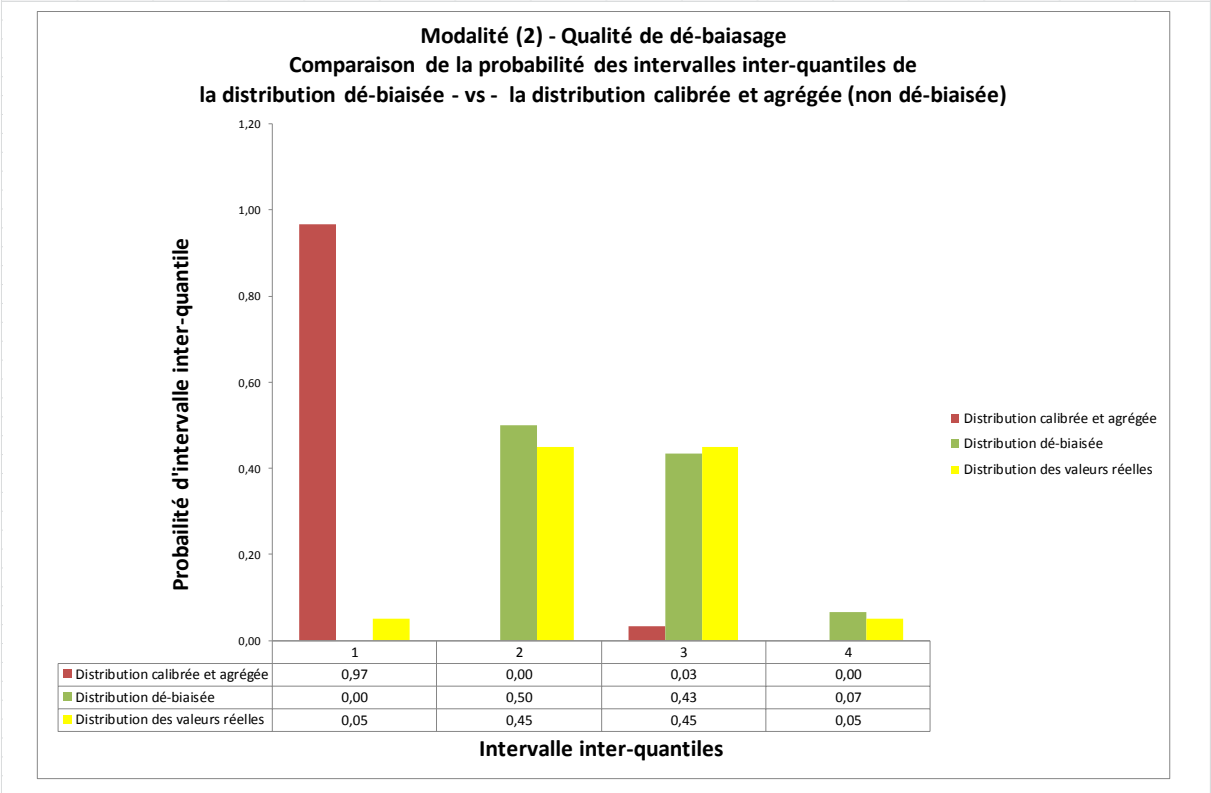


Figure 8-8. Distributions dé-biaisées des avis experts agrégés et calibrés selon la 2ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs)

Sur les graphiques des variables de calibration (FS) et (P_{fc}) (Figure 8-8) montrent que les nouveaux intervalles d'incertitude sont devenus plus larges et contiennent la majorité des vraies valeurs de calibration. Pour les variables déterministes (FS au glissement), nous notons une répartition des vraies valeurs qui parait correspondre à la répartition ciblée (ce qui est logique sachant que les variables de calibration sont les FS dans la 2ème modalité). En revanche, pour les variables probabilistes (P_{fc} au glissement), nous remarquons une concentration des vraies valeurs dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%], traduisant une tendance à surestimer la valeur centrale de la variable de calibration P_{fc} au glissement.

Pour pouvoir évaluer la qualité du résultat de la phase de dé-biaisage, nous procédons au calcul des probabilités des intervalles interquantiles avant dé-biaisage des variables de calibration (distributions calibrées et agrégées) et après dé-biaisage (distributions calibrées, agrégées et dé-biaisées), puis nous comparons ces résultats aux valeurs cibles (5%, 45%, 45%,

et 5%). Le graphique suivant (Figure 8-9) illustre cette comparaison pour la 2ème modalité d'application dont les variables de calibration sont les variables de calibration déterministes (FS). Le dé-biaisage obtenu est très proche de la distribution ciblée, avec une concentration des vraies valeurs de 0% au lieu de 5% dans l'intervalle interquantiles [0%, 5%], de 50% au lieu de 45% dans l'intervalle interquantiles [5%, 50%], de 47% au lieu de 45% dans l'intervalles interquantiles [50%, 95%] et de 3% au lieu de 5% dans l'intervalle interquantiles [95%, 100%].



	1	2	3	4
Distribution calibrée et agrégée	0,97	0,00	0,03	0,00
Distribution dé-biaisée	0,00	0,50	0,43	0,07
Distribution des valeurs réelles	0,05	0,45	0,45	0,05

Figure 8-9. Qualité de dé-biaisage présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution calibrée et agrégée selon la 2ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs)

Malgré le fait que le calcul itératif conduit à obtenir une distribution dé-biaisée des variables de calibration sur FS (c'est-à-dire, avec des probabilités interquantiles proches des valeurs cibles 5%, 45%, 45%, 5%), le résultat obtenu n'apparait pas entièrement satisfaisant car :

- Les intervalles d'incertitude obtenus sont très larges ;
- La majorité des vraies valeurs de variable de calibration P_{fc} au glissement se concentrent « à gauche » du quantile 50%.

Résultats de dé-biaisage des avis experts calibrés et agrégés selon la 3ème modalité d'application

En appliquant la démarche présentée dans la partie II (Démarches pour le dé-biaisage du jugement d'expert pour les digues), nous obtenons par calcul itératif les valeurs des coefficients de correction suivantes :

- coefficient β = 0.92 (pour corriger le quantile $q_{50\%}$) ;
- coefficient α_L = 1 (pour corriger le quantile $q_{5\%}$) ;
- coefficient α_U = 2.55 (pour corriger le quantile $q_{95\%}$).

Nous formulons les commentaires suivants :

- Le coefficient de correction ($\beta = 0.92$) reflète que le panel d'experts a tendance à majorer ses estimations concernant les valeurs centrales les plus vraisemblables (R_i). En d'autres termes, il faut appliquer un coefficient β sur les valeurs centrales issues de la phase d'agrégation pour retrouver la valeur du quantile 50% de la variable de calibration ;
- Le coefficient de correction $\alpha_L = 1$ reflète que les distances estimées entre (L_i) et (R_i) est en état bien estimées par le panel d'experts et qu'il n'est pas nécessaire de les corriger ;
- Le coefficient de correction ($\alpha_U = 2.55$) reflète que les distances estimées entre (R_i) et (U_i) tendent à être inférieures à celles qu'elles devraient être. En d'autres termes, il faut appliquer un coefficient α_U sur les distances entre (R_i) et (U_i) issues de la phase d'agrégation pour retrouver la distance dé-biaisée entre le quantile 50% et le quantile 95%.

En appliquant ces coefficients de correction sur les avis résultant de la phase d'agrégation, nous obtenons les avis dé-biaisés représentés par les graphiques suivantes :

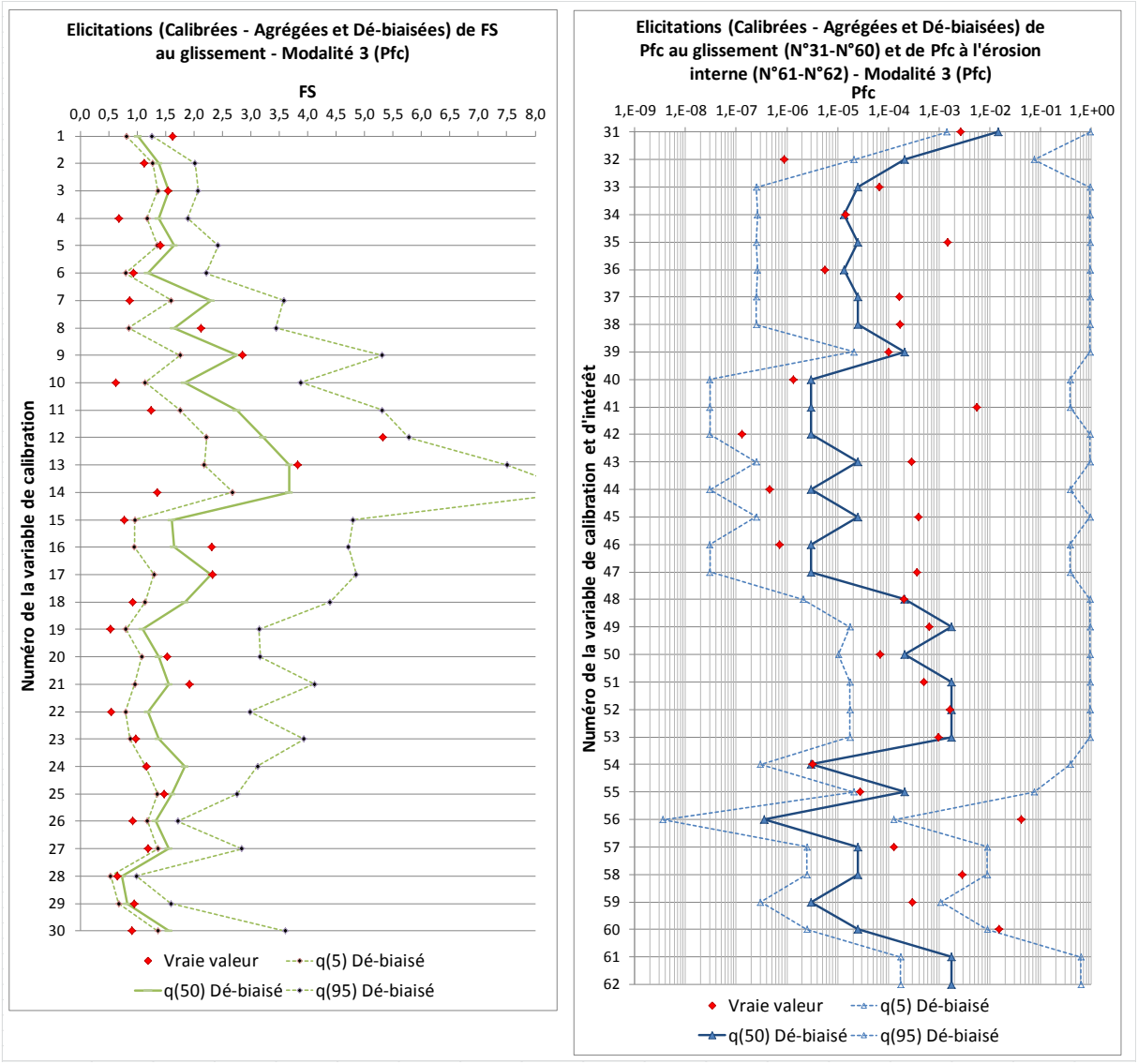
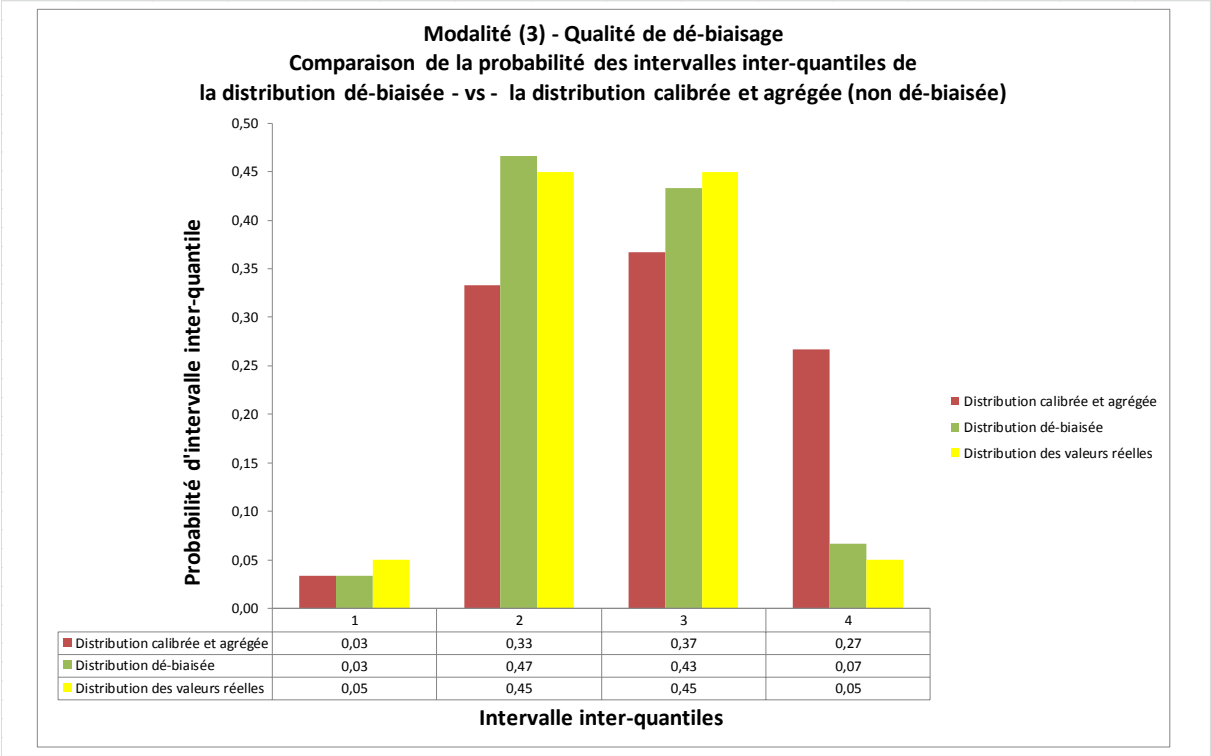


Figure 8-10. Distributions dé-biaisées des avis experts agrégés et calibrés selon la 3ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (P_{fc})

Sur les graphiques des variables de calibration (Fs) et (P_{fc}) (Figure 8-10) montrent que les nouveaux intervalles d'incertitude sont devenus plus larges et contiennent la majorité des vraies valeurs de calibration. Pour les variables probabilistes (P_{fc} au glissement), nous notons une répartition des vraies valeurs qui parait correspondre à la répartition ciblée (ce qui est logique sachant que les variables de calibration sont les P_{fc} au glissement dans la 3ème modalité). En revanche, ce ne serait pas le cas pour les variables (FS au glissement).

Pour pouvoir évaluer la qualité du résultat de la phase de dé-biaisage, nous procédons au calcul des probabilités des intervalles interquantiles avant dé-biaisage des variables de calibration (distributions calibrées et agrégées) et après dé-biaisage (distributions calibrées, agrégées et dé-biaisées), puis nous comparons ces résultats aux valeurs cibles (5%, 45%, 45% et 5%). Le graphique suivant (Figure 8-11) illustre cette comparaison pour la 3ème modalité d'application dont les variables de calibration sont uniquement les variables de calibration

probabilistes (P_{fc}). Le dé-biaisage obtenu est très proche de la distribution ciblée avec une concentration des vraies valeurs de 47% au lieu de 45% dans l'intervalle interquantiles [5%, 50%] et [50%, 95%] et de 3% au lieu de 5% dans l'intervalle interquantiles [0%, 5%] et [95%, 100%].



	1	2	3	4
Distribution calibrée et agrégée	0,03	0,33	0,37	0,27
Distribution dé-biaisée	0,03	0,47	0,43	0,07
Distribution des valeurs réelles	0,05	0,45	0,45	0,05

Figure 8-11. Qualité de dé-biaisage présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution calibrée et agrégée selon la 3ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (P_{fc})

Malgré le fait que le calcul itératif conduit à obtenir une distribution dé-biaisée des variables de calibration sur P_{fc} (c'est-à-dire, avec des probabilités interquantiles proches des valeurs cibles 5%, 45%, 45%, 5%), le résultat obtenu n'apparait pas entièrement satisfaisant car :

- Les intervalles d'incertitude obtenus sont très larges ;
- La majorité des vraies valeurs de variable de calibration FS au glissement se concentrent « à gauche » du quantile 50%.

8.1.4.3 **Conclusions**

Les principales conclusions de la phase de dé-biaisage de l'approche « EiCAD » sont les suivantes :

1. La phase de dé-biaisage permet d'analyser quantitativement les biais de sur-confiance et de sous-confiance entachant les élicitations expertes ;
2. La phase dé-biaisage permet de corriger, par des coefficients de correction, les effets de biais de sur confiance et de sous-confiance entachant les élicitations expertes. On

obtient une élicitation dé-biaisée. En contrepartie, on obtient des intervalles d'incertitude globalement plus larges et donc des résultats globalement moins informatifs.

8.2 Comparaison des résultats des modalités

L'objectif est de comparer les résultats finaux - issus de la mise en œuvre de l'approche « EiCAD » selon les trois modalités d'application - par rapport à la répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude dé-biaisé. Le Tableau 8-8 présente par rapport au facteur de sécurité (FS) et à la probabilité conditionnelle de défaillance (P_{fc}) la comparaison des résultats finaux :

Tableau 8-8. Comparaison des résultats finaux issus de la mise en œuvre de l'approche « EiCAD » selon des trois modalités d'application et par rapport à la répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude dé-biaisé

	FS	P_{fc}
1ère Modalité	Concentration des vraies valeurs de variable de calibration « à gauche » du quantile 50%	Concentration des vraies valeurs de variable de calibration « à droite » du quantile 50%
2ème Modalité	Bonne répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude [5%, 95%] et sur les deux côtés du quantile 50%	Concentration des vraies valeurs de variable de calibration « à gauche » du quantile 50%
3ème Modalité	Concentration des vraies valeurs de variable de calibration « à gauche » du quantile 50%	Bonne répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude [5%, 95%] et sur les deux côtés du quantile 50%

Nous notons que l'approche « EiCAD » est sensible au type de variable de calibration utilisé pour la déterminer les coefficients de correction des avis experts. Dès lors, afin d'obtenir une bonne répartition des vraies valeurs de variables de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude [5%, 95%] dé-biaisé et sur les deux côtés du quantile 50%, il est préférable d'utiliser :

- des variables de calibration déterministe (les facteurs de sécurité – FS) lors d'un traitement des variables d'intérêt déterministes ;
- des variables de calibration probabiliste (les probabilités conditionnelles de défaillance– P_{fc}) lors d'un traitement des variables d'intérêt probabilistes.

Nous en concluons donc que pour le domaine des digues et dans un objectif d'évaluer des variables d'intérêt probabilistes, il est préférable de privilégier les variables de calibration probabilistes (3ème modalité d'application).

8.3 Conclusion générale de l'approche « EiCAD »

Comme conclusion générale, l'approche « EiCAD » permet d'identifier quantitativement les biais de sur-confiance et de sous-confiance entachant les élicitations du panel d'expertes et permet de les corriger par des coefficients de correction.

Dans les résultats issus de l'application d'« EiCAD » effectuée sur un cas d'étude, nous constatons qu'un expert ayant donné des élicitations les moins biaisés a eu de ce fait le meilleur poids de calibration (95%), conduisant à rendre presque négligeable les élicitations des autres experts du panel. Cela a induit dans notre étude de cas que le résultat de la phase d'agrégation a été proche de la distribution brute de l'expert ayant eu le poids de calibration le plus fort et que la phase de dé-biaisage était effectuée principalement pour l'avis de cet expert.

Dans ce contexte, la réflexion principale se centre sur deux niveaux :

- améliorer la phase d'élicitation des avis d'expert afin de permettre d'harmoniser l'élicitation des intervalles d'incertitude entre les experts qui sont apparus très hétérogènes dans les élicitations des avis experts ;
- agir sur le protocole de calibration de Cooke (1991) pour que la discrimination des avis experts biaisés soit moins pénalisante au niveau de la pondération des avis experts. Cela exige en contrepartie d'adopter des protocoles statistiques différents de ceux proposés dans le modèle de Cooke.

9 Application de l'approche « EiDA »

Ce chapitre a pour objectif de tester l'approche « EiDA » comme alternative de l'approche « EiCAD ». Elle consiste à dé-biaiser les avis bruts de chacun des experts avant la phase d'agrégation. Selon les trois modalités d'application, l'approche « EiDA » est appliquée à l'étude de cas de la digue du Drac rive gauche. Le schéma ci-contre présente les objectifs des différentes phases de l'approche qui sont respectivement : 1) l'**E**licitation **i**ndividuelle des avis experts, 2) le **D**é-biaisage des avis experts et 3) l'**A**grégation des avis experts.

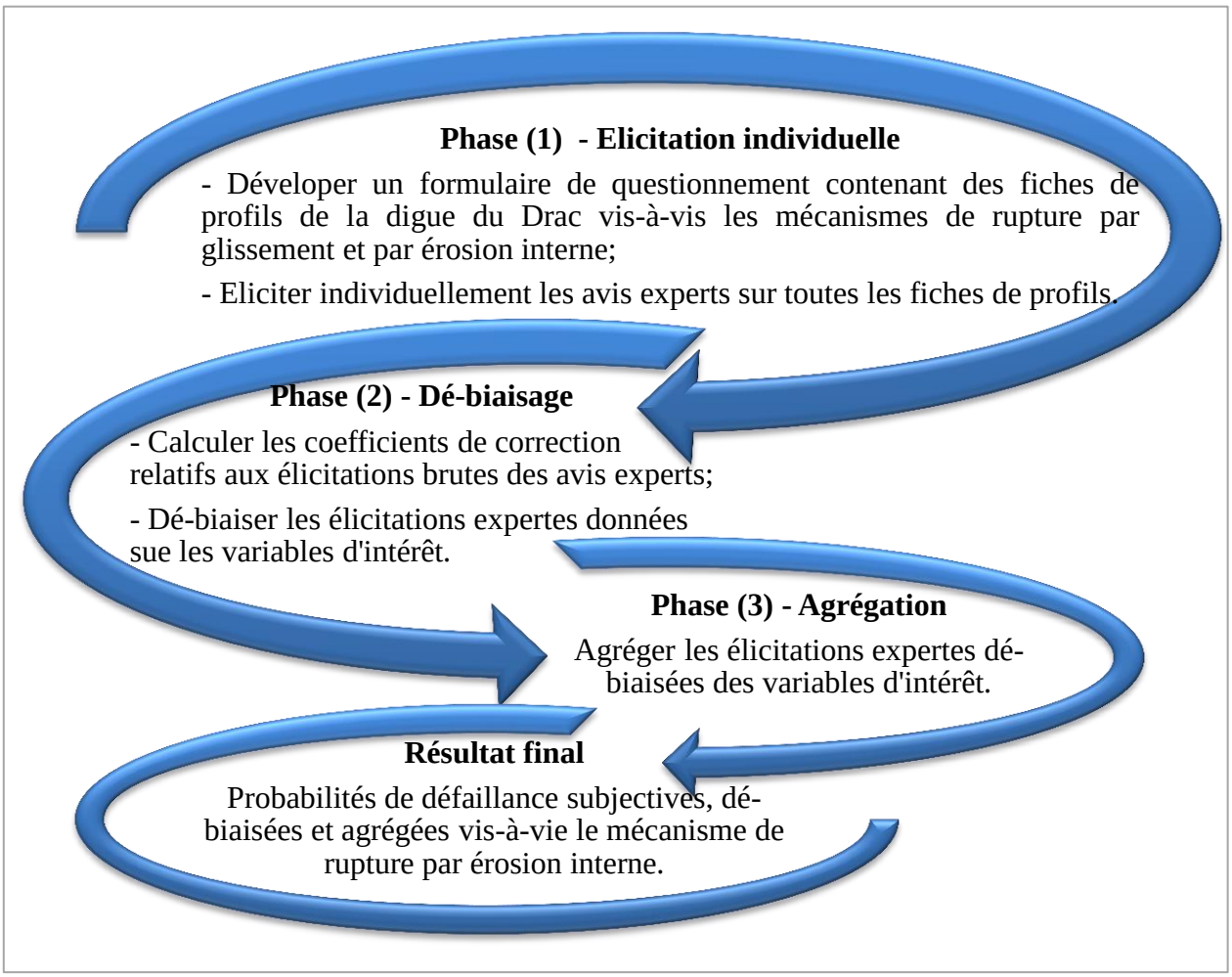


Figure 9-1. Objectifs des phases d'application de l'approche « EiDA » au domaine des digues fluviales

9.1 Approche « EiDA » - Elicitation individuelle, Dé-biaisage et Agrégation des avis experts

9.1.1 Phase d'élicitation individuelle

L'application, les résultats, les discussions et les conclusions sont identiques à la phase d' « **E**licitation **i**ndividuelle » de l'approche « EiCAD » (§ Chapitre 8). Cependant, dans l'approche « EiDA », le dé-biaisage est effectué pour chacune des élicitations brutes des différents experts à la différence de l'approche « EiCAD » où le dé-biaisage est appliqué après agrégation des élicitations des experts.

9.1.2 Phase de dé-biaisage

9.1.2.1 **Application**

L'application est identique à la phase de « **D**é-biaisage » des avis experts de l'approche « EiCAD » (§ Chapitre 8).

9.1.2.2 **Résultats et discussions**

Dans cette section, nous présentons une synthèse des distributions probabilistes dé-biaisées et une analyse des résultats issus de l'application des trois modalités d'application d'« EiDA » :

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes des experts obtenus selon la 1ère modalité d'application

Les valeurs des coefficients de correction obtenues par calcul itératif pour les élicitations des différents experts du panel sont présentées dans le **Tableau 9-1** suivant:

Tableau 9-1. Coefficients de correction obtenus selon la 1ère modalité d'application d'EiDA

	Coefficients de correction obtenus selon la 1ère modalité d'application d'EiDA		
Expert (N°)	β	α_L	α_U
Expert (1)	0.12	4.45	19.89
Expert (2)	0.12	10.3	12.4
Expert (3)	0.36	11.14	6.37
Expert (4)	0.44	8	4.81
Expert (5)	0.15	2.95	9.6
Expert (6)	1.09	6.34	3.8

- Analyse du coefficient de correction β des valeurs centrales (q50%) :

Nous notons que le total de valeurs obtenues est inférieur à 1 ce qui signifie que la majorité des experts a tendance à majorer ses estimations concernant la valeur centrale. L'avis de l'expert (1) et l'avis de l'expert (2) sont ceux qui ont eu une correction forte avec un $\beta = 0.12$

- Analyse du coefficient de correction α_L de la valeur minimale de l'intervalle d'incertitude (q5%) :

Nous notons que le total des valeurs obtenues est supérieur à 1, ce qui signifie que les experts du panel ont tendance à minorer la distance entre la valeur centrale (q50%) et la valeur minimale (q5%) de l'intervalle d'incertitude. L'avis de l'expert (3) est celui qui a eu la correction la plus forte avec $\alpha_L = 11.14$ et l'avis de l'expert (5) est celui qui a eu une correction la plus faible avec $\alpha_L = 2.95$

- Analyse du coefficient de correction α_U de la valeur maximale de l'intervalle d'incertitude (q95%) :

Nous notons que le total des valeurs obtenues est supérieur à 1 ce qui signifie que les experts du panel ont tendance à minorer la distance entre la valeur centrale (q50%) et la valeur maximale (q95%) de l'intervalle d'incertitude. L'avis de l'expert (1) est celui qui a eu la correction la plus forte avec $\alpha_U = 19.89$ et l'avis de l'expert (6) est celui qui a eu la correction la plus faible avec $\alpha_U = 3.8$

En appliquant ces coefficients de correction sur les avis élicités par les experts, nous obtenons les avis dé-biaisés, présentés intégralement dans l'annexe C. Les graphiques de la Figure 9-2 illustrent les résultats du dé-biaisage pour l'expert (1).

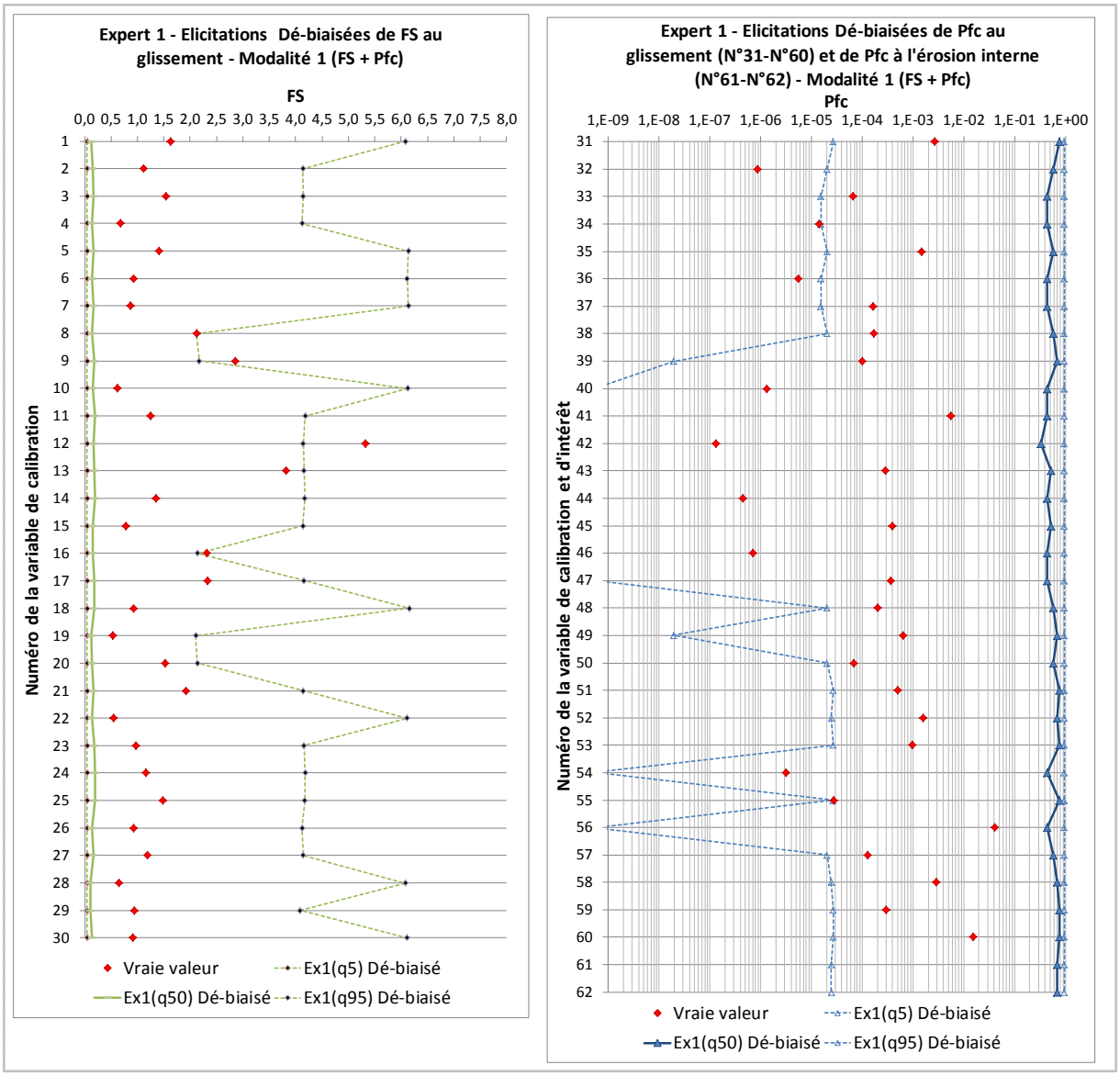


Figure 9-2. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (1) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 90% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
  - 10% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **D'après le graphique de la variable de calibration (P_{fc}) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 10% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 90% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;

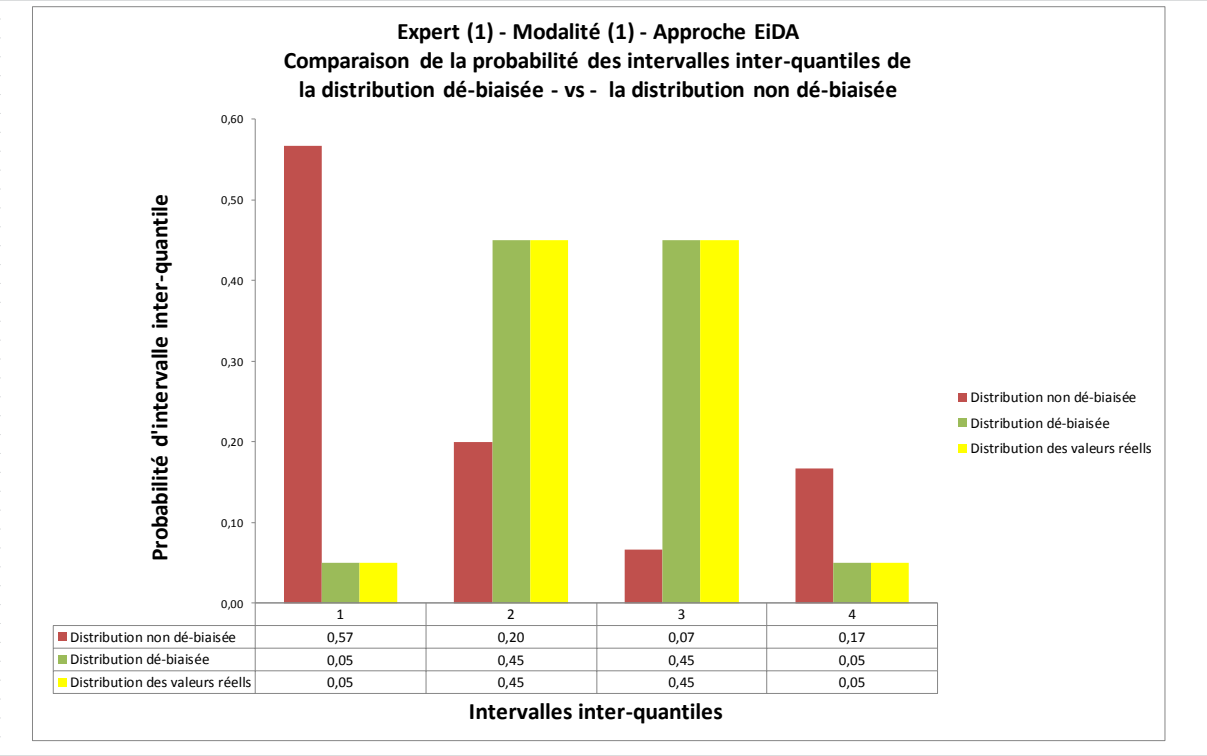
- 0% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
- 0% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].

- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles de la variable ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Après dé-biaisage, nous pouvons dire que les élicitations de l'expert (1) présentent une tendance à la sous-confiance sur les élicitations de la variable de calibration (FS) au glissement car (100%) des variables de calibration se concentrent dans les deux derniers intervalles d'incertitude [50%, 95%] et [95%, 100%]. L'expert (1) a donc donné des valeurs faibles de la variable de calibration (FS). Aussi, les élicitations de l'expert (1) sur les variable de calibration (P_{fc}) au glissement présentent une tendance à la sous-confiance, car les variables de calibration (100%) se concentrent dans les deux premiers intervalles d'incertitude [0%, 5%] et [5%, 50%]. L'expert (1) a donc donné des valeurs élevées de la variable de calibration (P_{fc}).

Pour évaluer la qualité du résultat de la phase de dé-biaisage de l'avis de l'expert (1), nous procédons au calcul des probabilités des intervalles interquantiles avant dé-biaisage (distributions des avis experts bruts) et après dé-biaisage (distributions dé-biaisées), puis nous comparons ces résultats aux valeurs cibles (5%, 45%, 45% et 5%). Le graphique suivant (Figure 9-3) illustre cette comparaison pour la 1ère modalité d'application pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc}). Nous remarquons l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'obtenir une distribution pour laquelle les probabilités des intervalles interquantiles correspondent aux valeurs cibles (5% ; 45% ; 45% ; 5%) de la distribution des valeurs réelles.

Le **Tableau 9-2** présente une synthèse sur la qualité de dé-biaisage des avis bruts des experts du panel. Nous remarquons sur la majorité des avis experts dé-biaisés l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'avoir de distributions probabilistes proches de la distribution des valeurs réelles (5% ; 45% ; 45% ; 5%)..



	1	2	3	4
Distribution non dé-biaisée	0,57	0,20	0,07	0,17
Distribution dé-biaisée	0,05	0,45	0,45	0,05
Distribution des valeurs réells	0,05	0,45	0,45	0,05

Figure 9-3. Qualité de dé-biaisage des avis bruts de l'expert (1) présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution non dé-biaisée, selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Tableau 9-2. Qualité de dé-biaisage des avis experts du panel dé-biaisés selon la 1ère modalité d'application d'EiDA

intervalles interquartiles	[0% - 5%]	[5% - 50%]	[50% - 95%]	[95% - 100%]
Valeurs cibles (probabilité des intervalles interquartiles)	5%	45%	45%	5%
Expert (1) (avant / après dé-biaisage)	57% / 5%	20% / 45%	7% / 45%	17% / 5%
Expert (2) (avant / après dé-biaisage)	73% / 5%	7% / 45%	3% / 45%	17% / 5%
Expert (3) (avant / après dé-biaisage)	72% / 5%	10% / 45%	3% / 45%	15% / 5%
Expert (4) (avant / après dé-biaisage)	67% / 5%	18% / 45%	5% / 45%	10% / 5%
Expert (5) (avant / après dé-biaisage)	28% / 5%	10% / 45%	12% / 45%	50% / 5%
Expert (6) (avant / après dé-biaisage)	30% / 8%	27% / 42%	27% / 47%	17% / 3%

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes des experts obtenus selon la 2ème modalité d'application

Les valeurs des coefficients de correction obtenues par calcul itératif pour les élicitations des différents experts du panel sont présentées dans le **Tableau 9-3** suivant :

Tableau 9-3. Coefficients de corrections obtenus selon la 2ème modalité d'application d'EiDA

	Coefficients de correction obtenus selon la 2ème modalité d'application d'EiDA		
Expert (N°)	β	α_L	α_U
Expert (1)	0.85	2.37	12.75
Expert (2)	0.73	4.65	11.61
Expert (3)	0.76	1.48	4.63
Expert (4)	0.89	2.47	6.4
Expert (5)	0.65	2.4	8.43
Expert (6)	0.74	1.75	1.43

- Analyse du coefficient de correction β des valeurs centrales (q50%) :

Nous notons que le total de valeurs obtenues est inférieur à 1, ce qui signifie que la totalité des experts du panel a tendance à majorer ses estimations concernant la valeur centrale. L'avis de l'expert (5) est celui qui a eu une correction forte avec un $\beta = 0.65$.

- Analyse du coefficient de correction α_L de la valeur minimale de l'intervalle d'incertitude (q5%) :

Nous notons que le total des valeurs obtenues est supérieur à 1 ce qui signifie que les experts du panel ont tendance à minorer la distance entre la valeur centrale (q50%) et la valeur minimale (q5%) de l'intervalle d'incertitude. L'avis de l'expert (2) est celui qui a eu la correction la plus forte avec $\alpha_L = 4.65$ et l'avis de l'expert (3) est celui qui a eu la correction la plus faible avec $\alpha_L = 1.48$

- Analyse du coefficient de correction α_U de la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude (q95%) :

Nous notons que le totale des valeurs obtenues est supérieur à 1 ce qui signifie que les experts du panel ont tendance à minorer la distance entre la valeur centrale (q50%) et la valeur maximale (q95%) de l'intervalle d'incertitude. L'avis de l'expert (1) est celui qui a eu la correction la plus forte avec $\alpha_U = 12.75$ et l'avis de l'expert (6) est celui qui a eu une correction la plus faible avec $\alpha_U = 1.43$

En appliquant ces coefficients de correction sur les avis élicités par les experts, nous obtenons les avis dé-biaisés. La Figure 9-4 illustre les résultats du dé-biaisage pour l'expert (1), les résultats complets sont présentés en annexe C.

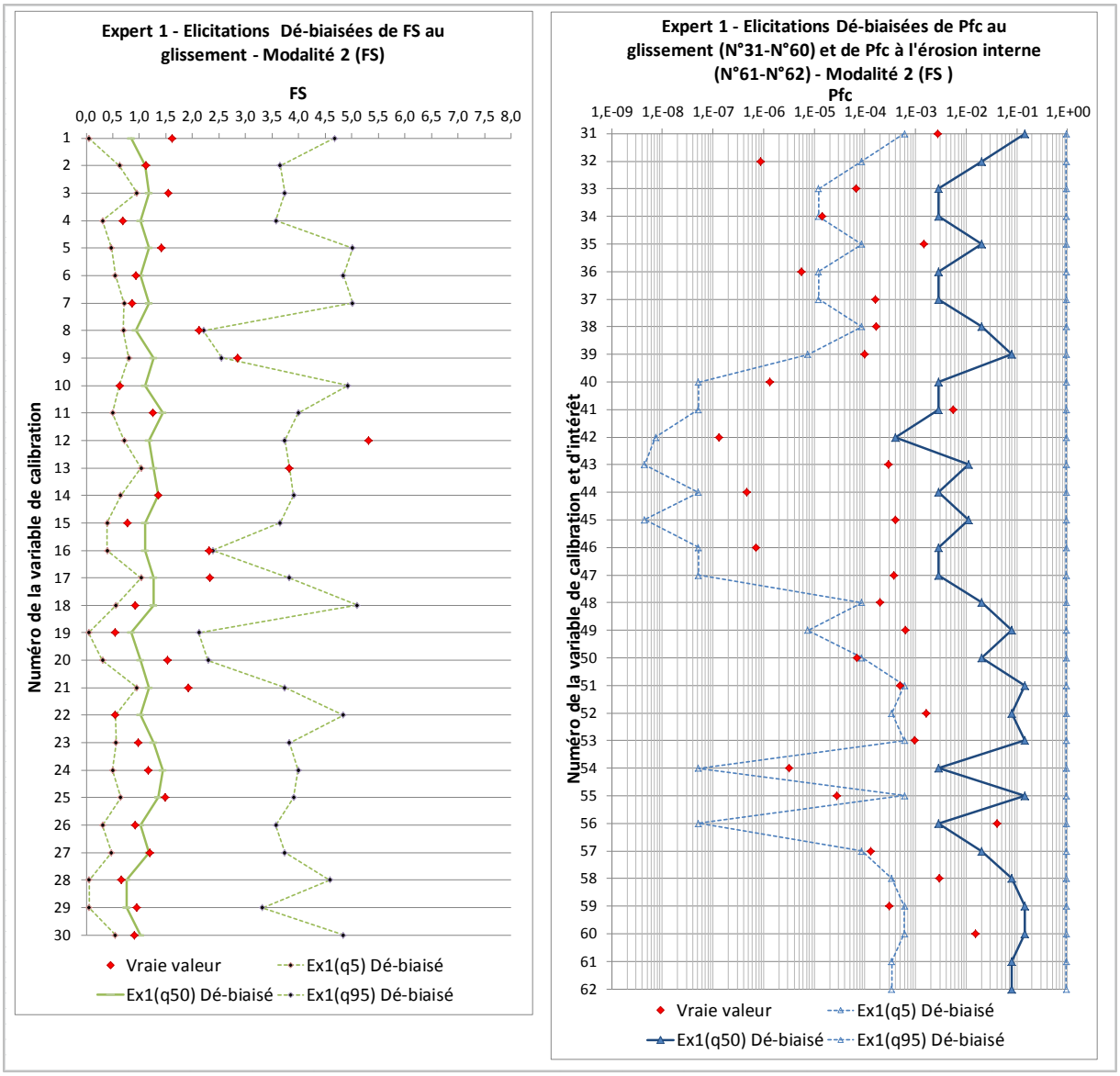


Figure 9-4. Distributions dé-biaisées, des avis bruts de l'expert (1) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 3% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 47% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 43% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
  - 7% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **D'après le graphique de la variable de calibration (P_{fc}) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 20% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 73% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;

- 7% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
- 0% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].

- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles de la variable de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Après dé-biaisage, nous remarquons que les élicitations de l'expert (1) ont eu une distribution homogène des vraies valeurs de variable de calibration (FS) au glissement sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude [5%, 95%]. Aussi, les élicitations de l'experts (1) sur les variables de calibration (P_{fc}) au glissement présentent une tendance à la sous-confiance, car (93%) des variables de calibration se concentrent dans les deux premiers intervalles d'incertitude [0%, 5%] et [5%, 50%]. L'expert (1) a donc donné des valeurs élevées de la variable de calibration (P_{fc}) au glissement.

Pour évaluer la qualité du résultat de la phase de dé-biaisage, nous procédons au calcul des probabilités des intervalles interquantiles avant dé-biaisage (distributions des avis experts bruts) et après dé-biaisage (distributions dé-biaisées), puis nous comparons ces résultats aux valeurs cibles (5%, 45%, 45% et 5%). Le graphique suivant (Figure 9-5) illustre cette comparaison pour la 2ème modalité d'application pour les variables de calibration (Fs). Nous remarquons l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'obtenir une distribution probabiliste proche de la distribution des valeurs réelles (5% ; 45% ; 45% ; 5%).

Le **Tableau 9-4** suivant présente une synthèse sur la qualité de dé-biaisage des avis bruts des experts du panel. Nous remarquons sur la majorité des avis experts dé-biaisés l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'avoir de distributions probabilistes proches de la distribution des valeurs réelles (5% ; 45% ; 45% ; 5%).

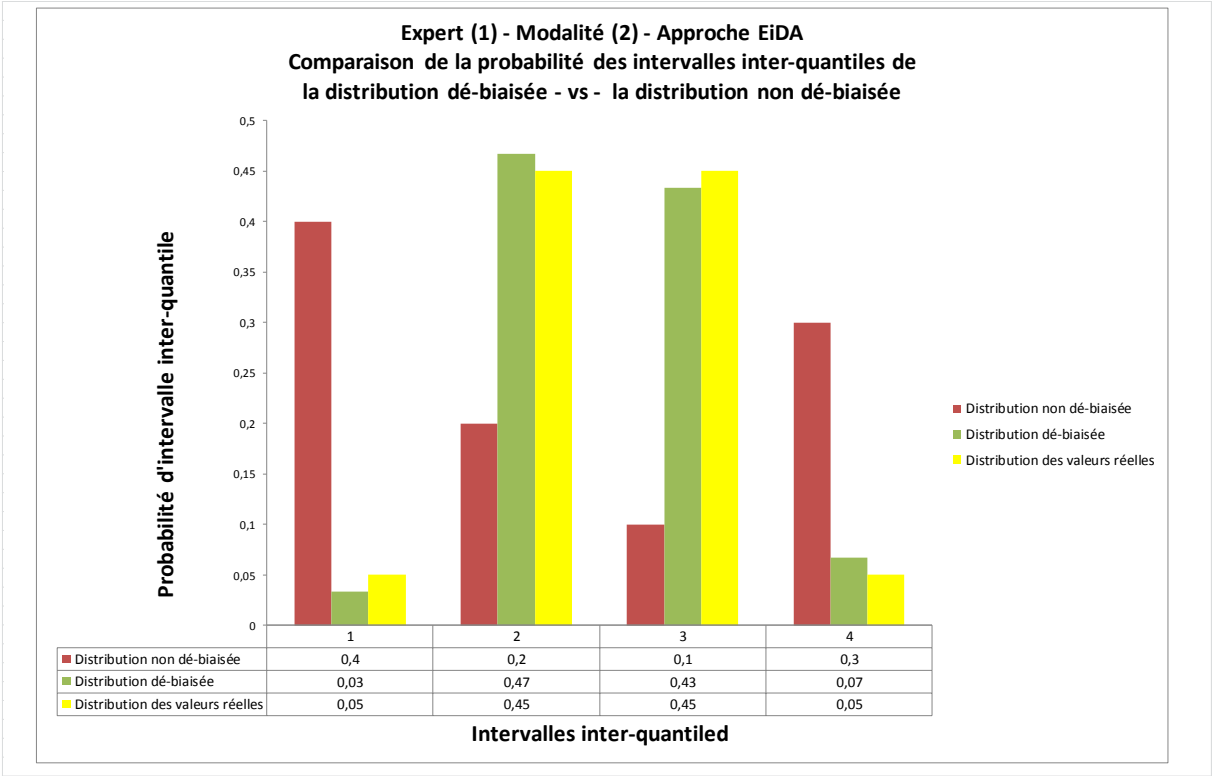


Figure 9-5. Qualité de dé-biaisage des avis bruts de l'expert (1) présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution non-dé-biaisée, selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » par les variables de calibration (Fs)

Tableau 9-4. Qualité de dé-biaisage des avis experts du panel dé-biaisés selon la 2ème modalité d'application d'EiDA

intervalles interquartiles	[0% - 5%]	[5% - 50%]	[50% - 95%]	[95% - 100%]
Valeurs cibles (probabilité des intervalles interquartiles)	5%	45%	45%	5%
Expert (1) (avant / après dé-biaisage)	40% / 3%	20% / 47%	10% / 43%	30% / 7%
Expert (2) (avant / après dé-biaisage)	75% / 7%	8% / 43%	0% / 47%	17% / 3%
Expert (3) (avant / après dé-biaisage)	55% / 3%	14% / 47%	7% / 43%	24% / 7%
Expert (4) (avant / après dé-biaisage)	40% / 3%	30% / 47%	10% / 43%	20% / 7%
Expert (5) (avant / après dé-biaisage)	57% / 3%	17% / 47%	7% / 43%	20% / 7%
Expert (6) (avant / après dé-biaisage)	57% / 3%	20% / 47%	17% / 43%	7% / 7%

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes des experts obtenus selon la 3ème modalité d'application

Les valeurs des coefficients de correction obtenues par calcul itératif pour les élicitations des différents experts du panel sont présentées dans le **Tableau 9-5** suivant :

Tableau 9-5. Coefficients de corrections obtenus selon la 3ème modalité d'application d'EiDA

	Coefficients de correction obtenus selon la 3ème modalité d'application d'EiDA		
Expert (N°)	β	α_L	α_U
Expert (1)	1.89	1.64	3.17
Expert (2)	2.05	4.85	3.91
Expert (3)	1.87	3.23	4.84
Expert (4)	3.08	4.56	5.57
Expert (5)	1	1	14.16
Expert (6)	0.92	1	4.57

- Analyse du coefficient de correction β des valeurs centrales (q50%) :

Nous notons que le total de valeurs obtenues est supérieur à 1, ce qui signifie que la majorité des experts du panel a tendance à minorer ses estimations concernant la valeur centrale. L'avis de l'expert (4) est celui qui a eu la correction la plus forte avec un $\beta = 3.08$ tandis que l'avis de l'expert (5) est celui qui n'a pas eu besoin d'une correction sur ses valeurs centrales élicitées pour cela, il a obtenu un coefficient $\beta = 1$ de correction.

- Analyse du coefficient de correction α_L de la borne inférieure de l'intervalle d'incertitude (q5%) :

Nous notons que le total de valeurs obtenues est supérieur à 1 ce qui signifie que les experts du panel ont tendance à minorer la distance entre la valeur centrale (q50%) et la valeur minimale (q5%) de l'intervalle d'incertitude. L'avis de l'expert (2) est celui qui a eu la correction la plus forte avec $\alpha_L = 4.85$ et l'avis de l'expert (6) et l'avis de l'expert (5) sont ceux qui n'avaient pas eu besoin d'une correction sur leurs valeurs élicitées sur les valeurs minimales de l'intervalle d'incertitude, pour cela ils ont obtenu un coefficient $\alpha_L = 1$ de correction.

- Analyse du coefficient de correction α_U de la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude (q95%) :

Nous notons que le totale de valeurs obtenues est supérieur à 1 ce qui signifie que les experts du panel ont tendance à minorer la distance entre la valeur centrale (q50%) et la valeur maximale (q95%) de l'intervalle d'incertitude. L'avis de l'expert (5) est celui qui a eu la correction la plus forte avec $\alpha_U = 14.16$ et l'avis de l'expert (1) est celui qui a eu la correction la plus faible avec $\alpha_U = 3.17$.

En appliquant ces coefficients de correction sur les avis élicités par les experts, nous obtenons les avis dé-biaisés. La Figure 9-6 illustre les résultats du dé-biaisage pour l'expert (1), les résultats complets sont présentés en annexe C.

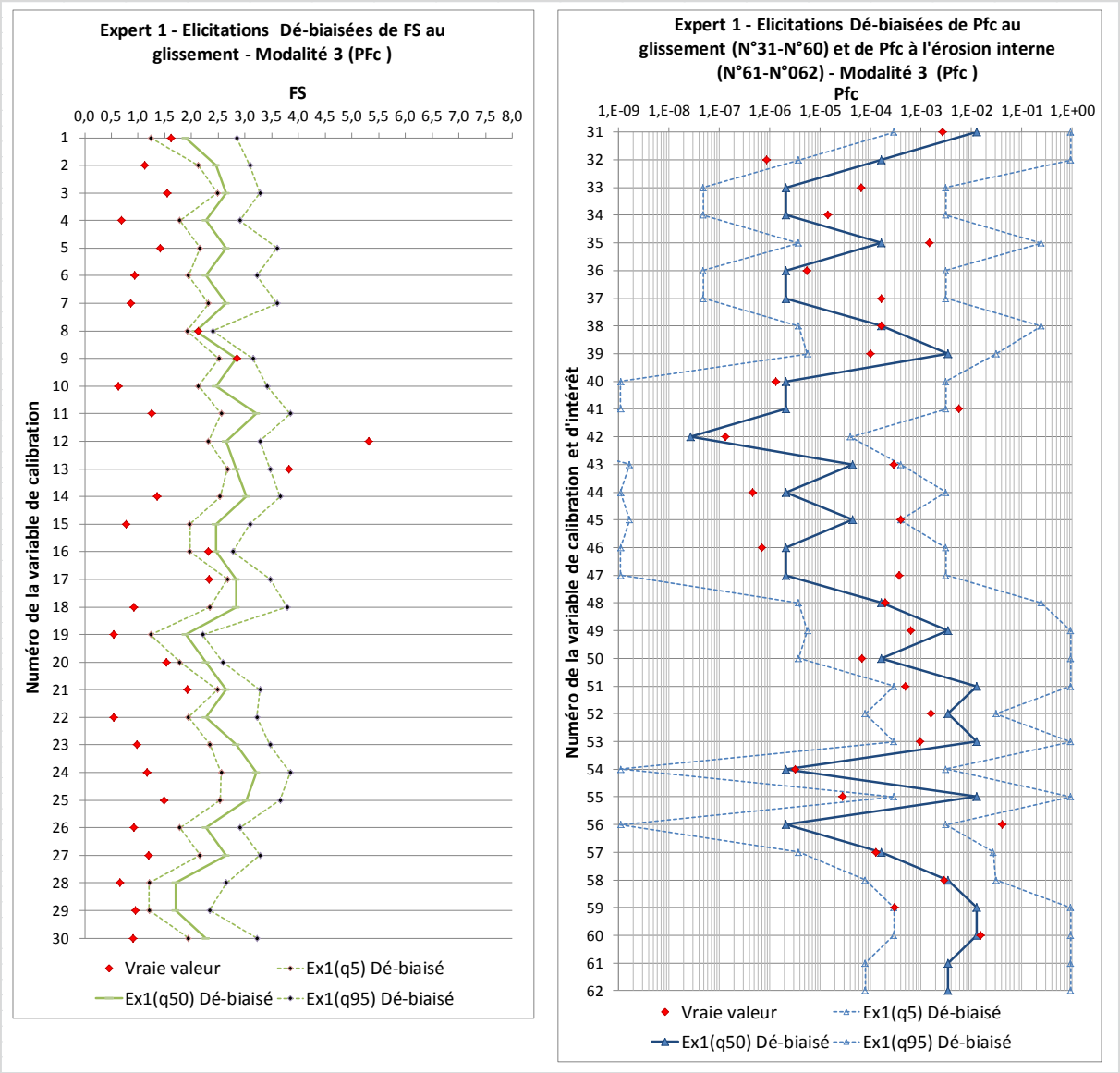


Figure 9-6. Distributions dé-biaisées, des avis bruts de l'expert (1), selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (P_{fc})

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
    - 79% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
    - 7% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
    - 7% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
    - 7% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].

- **D'après le graphique de la variable de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
    - 7% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
    - 43% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
    - 43% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
    - 7% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles de la variable ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Après dé-biaisage, nous remarquons que les élicitations de l'expert (1) des variables de calibration (FS) au glissement présentent une tendance à la sur-confiance, car les variables de calibration (79%) se concentrent dans premier intervalle d'incertitude [0%, 5%]. L'expert (1) a donc donné des valeurs élevées des variables de calibration (FS). Aussi, les élicitations de l'expert (1) ont eu une distribution homogène des vraies valeurs de variable de calibration (P_{fc}) au glissement sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude [5%, 95%].

Pour évaluer la qualité du résultat de la phase de dé-biaisage, nous procédons au calcul des probabilités des intervalles interquantiles avant dé-biaisage (distributions des avis experts bruts) et après dé-biaisage (distributions dé-biaisées), puis nous comparons ces résultats aux valeurs cibles (5%, 45%, 45% et 5%). Le graphique suivant (Figure 9-7) illustre cette comparaison pour la 3ème modalité d'application pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc}). Nous remarquons l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'avoir une distribution probabiliste proche de la distribution des valeurs réelles (5% ; 45% ; 45% ; 5%).

Le **Tableau 9-6** présente une synthèse sur la qualité de dé-biaisage des avis bruts des experts du panel. Nous remarquons sur la majorité des avis experts dé-biaisés l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'obtenir de distributions probabilistes proches de la distribution des valeurs réelles (5% ; 45% ; 45% ; 5%).

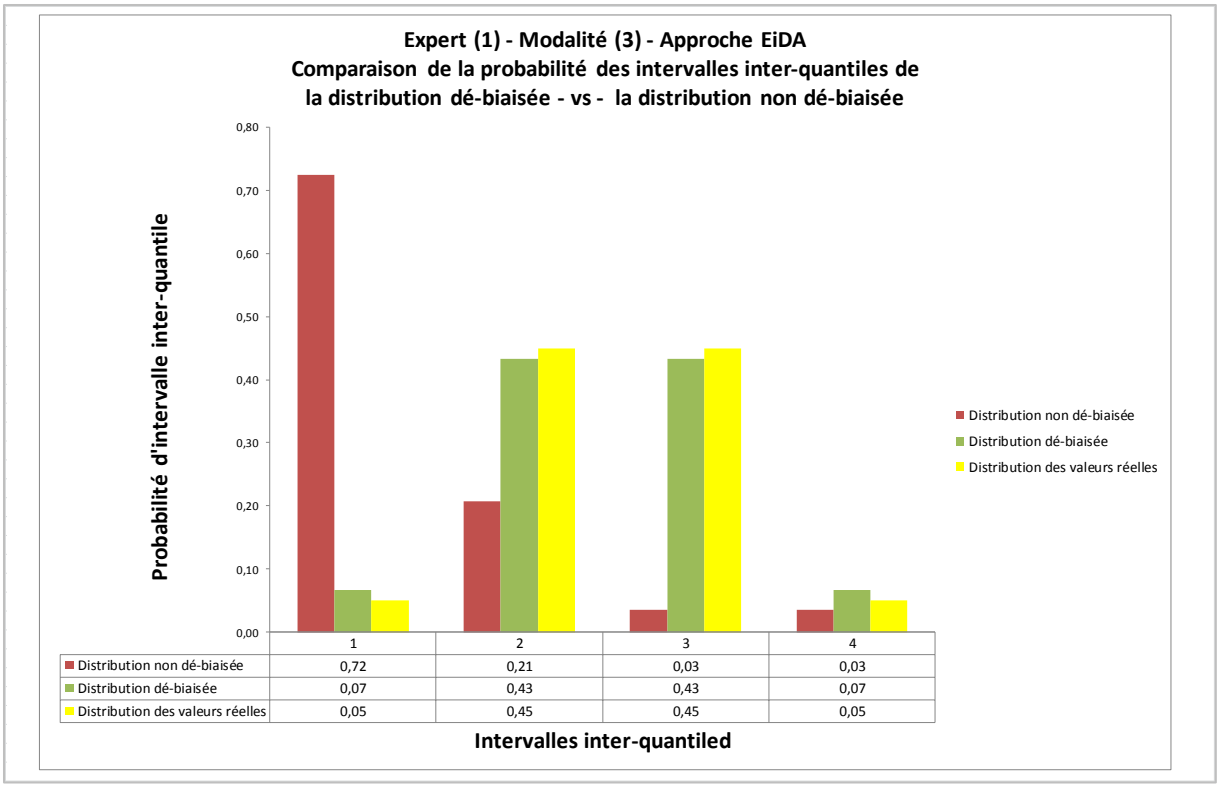


Figure 9-7. Qualité de dé-biaisage des avis bruts de l'expert (1) présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution non dé-biaisée, selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » par les variables de calibration (P_{fc})

Tableau 9-6. Qualité de dé-biaisage des avis experts du panel dé-biaisés selon la 3ème modalité d'application d'EiDA

intervalles interquartiles	[0% - 5%]	[5% - 50%]	[50% - 95%]	[95% - 100%]
Valeurs cibles (probabilité des intervalles interquartiles)	5%	45%	45%	5%
Expert (1) (avant / après dé-biaisage)	72% / 7%	21% / 43%	3% / 43%	3% / 7%
Expert (2) (avant / après dé-biaisage)	83% / 3%	10% / 47%	3% / 47%	3% / 3%
Expert (3) (avant / après dé-biaisage)	87% / 3%	7% / 47%	0% / 43%	7% / 7%
Expert (4) (avant / après dé-biaisage)	93% / 3%	7% / 47%	0% / 43%	0% / 7%
Expert (5) (avant / après dé-biaisage)	0% / 0%	0% / 0%	0% / 90%	100% / 10%
Expert (6) (avant / après dé-biaisage)	3% / 3%	33% / 47%	37% / 43%	27% / 7%

9.1.2.3 **Conclusions**

Les principales conclusions de la phase de dé-biaisage de l'approche « EiDA » sont les suivantes :

1. la phase de dé-biaisage effectuée sur des avis bruts des experts permet d'identifier quantitativement des tendances à la sur-confiance ou à la sous-confiance relativement aux intervalles d'incertitude ainsi et aux valeurs centrales élicitées.
2. La phase dé-biaisage permet de corriger, par des coefficients de correction, les effets de biais de sur confiance et de sous-confiance entachant les élicitations brutes de chaque expert. Nous obtenons une élicitation dé-biaisée. En contrepartie, nous obtenons des intervalles d'incertitude globalement plus larges et une information parfois trop imprécise pour être exploitée.

9.1.3 Phase d'agrégation

9.1.3.1 **Application**

Dans l'approche « EiDA », la phase suivante à la phase de « **D**é-biaisage» est la phase d'« **A**grégation » des avis experts. Dans cette phase, le modèle appliqué est le modèle d'agrégation des avis experts de Lichtendahl *et al.* (2013) par agrégation par la moyenne des quantiles. Mathématiquement, chaque expert aura un poids constant correspondant à $\left(\frac{1}{nombre\ des\ experts\ du\ panel}\right)$. Cela revient à agréger les élicitations expertes dé-biaisées par la moyenne des quantiles.

Nous appliquons cette phase d'agrégation selon les trois modalités d'application.

Nous présentons dans la section suivante les distributions agrégées de tous les avis experts dé-biaisés que nous les nommons « les distributions probabilistes du panel d'experts ».

9.1.3.2 Résultats et discussions

Résultats d'agrégation des élicitations dé-biaisées des avis experts selon la 1ère modalité

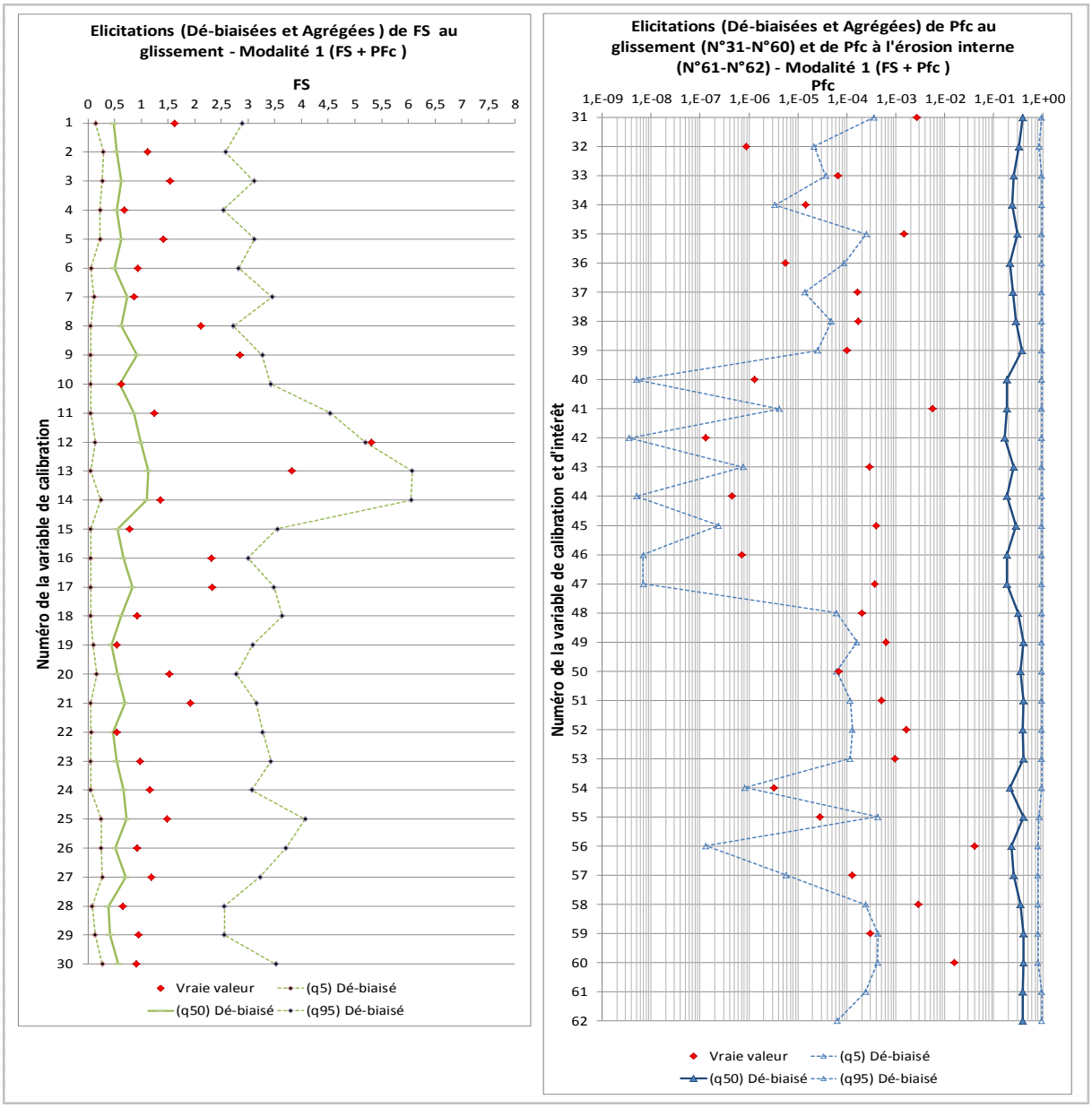


Figure 9-8. Distributions agrégées des avis experts dé-biaisés selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Analyse des élicitations brutes dé-biaisées et agrégées du panel d'experts par rapport à la justesse :

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;

  - 97% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
  - 3% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **D'après le graphique de la variable de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 13% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 87.7% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles des variables de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Nous remarquons que les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (FS) au glissement présentent une tendance à la sous-confiance, car 100% des vraies valeurs de variables de calibration se concentrent dans les deux derniers intervalles d'incertitude [50%, 95%] et [95%, 100%]. Ce panel d'experts a donc donné des valeurs faibles de la variable de calibration (FS). Aussi, les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (P_{fc}) au glissement présentent une tendance à la sous-confiance, car 100% des vraies valeurs de variables de calibration se concentrent dans les deux premiers intervalles d'incertitude [0%, 5%] et [5%, 50%].

Analyse des élicitations brutes dé-biaisée et agrégées du panel d'experts par rapport à la précision (largeur des intervalles d'incertitude) :

- **Les élicitations expertes calibrées et agrégées des variables de calibration (FS) au glissement** donnent comme score d'entropie (mesure de la précision) une valeur de 0.32 ;
- **Les élicitations expertes calibrées et agrégées des variables de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) au glissement** donnent comme score d'entropie (mesure de la précision) une valeur de 0.46 ;
- **Les élicitations expertes données sur les variables de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** donnent comme score d'entropie (mesure de la précision) une valeur de 0.25.

Nous notons que les élicitations des intervalles d'incertitude du panel d'experts sur les variables de calibration (FS) et des (P_{fc}) présentent une tendance à la sous-confiance et que ces intervalles d'incertitude sont larges.

Pour pouvoir évaluer la qualité du résultat final de dé-biaisage et d'agrégation, nous procédons au calcul des probabilités des intervalles interquantiles finaux (distributions dé-biaisées et agrégées), puis nous comparons ces résultats aux valeurs cibles (5%, 45%, 45%, 5%). Le graphique suivant (Figure 9-9) illustre cette comparaison pour la 1ère modalité d'application dont les variables de calibration sont les variables de calibration déterministes (FS) et probabilistes (P_{fc}).

Nous remarquons l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'obtenir de distributions probabilistes proches de la distribution des valeurs réelles (5% ; 45% ; 45% ; 5%).

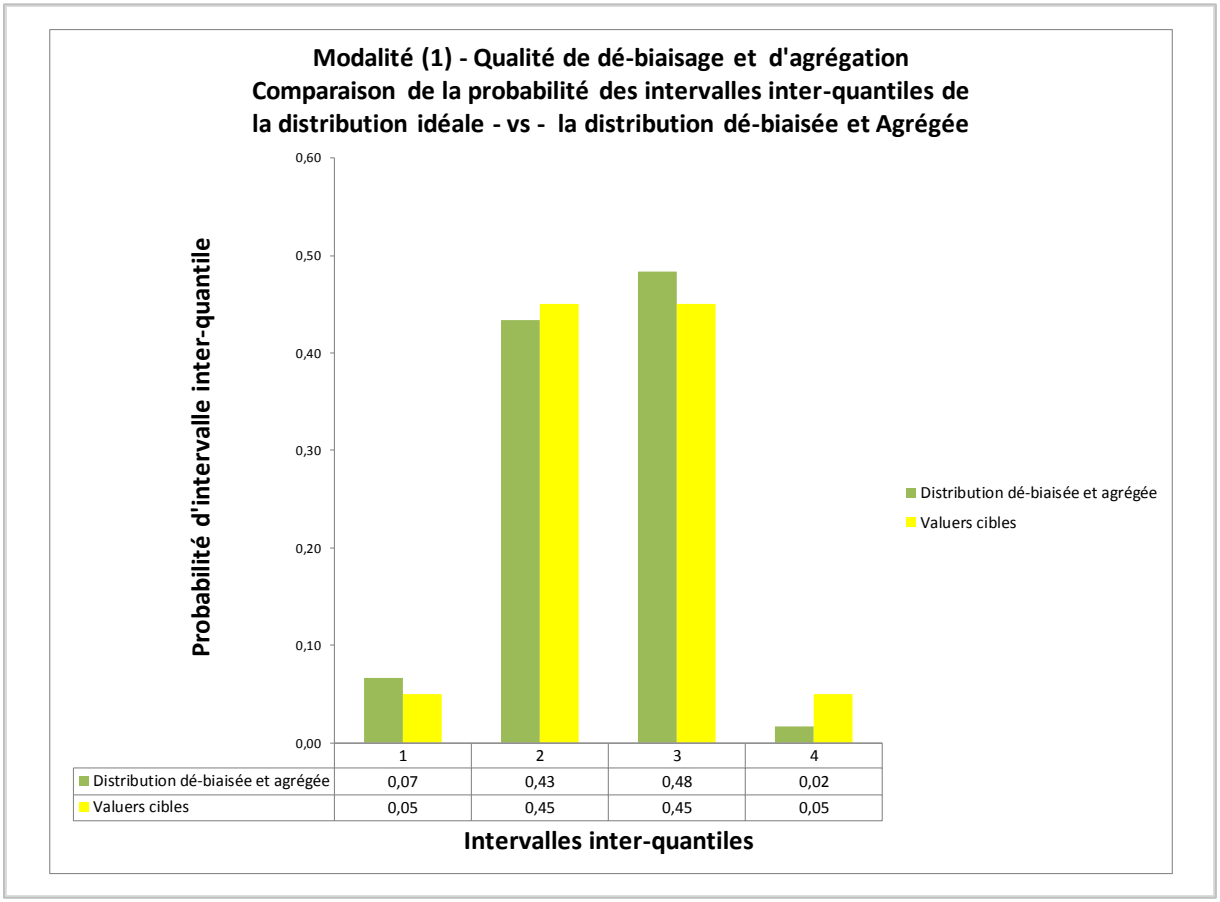


Figure 9-9. Qualité de dé-biaisage et d'agrégation présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée et agrégée vs la distribution idéale selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Malgré le fait que le calcul itératif conduit à obtenir une distribution dé-biaisée des variables de calibration sur P_{fc} (c'est-à-dire, avec des probabilités interquantiles proches des valeurs cibles 5%, 45%, 45%, 5%), le résultat obtenu n'apparait pas entièrement satisfaisant car :

- Les intervalles d'incertitude obtenus sont très larges ;
- La majorité des vraies valeurs de variable de calibration FS au glissement se concentrent « à droite » du quantile 50% ;
- La majorité des vraies valeurs de variable de calibration P_{fc} ai glissement se concentrent « à gauche » du quantile 50%.

Résultats d'agrégation des élicitations dé-biaisées des avis experts selon la 2ème modalité

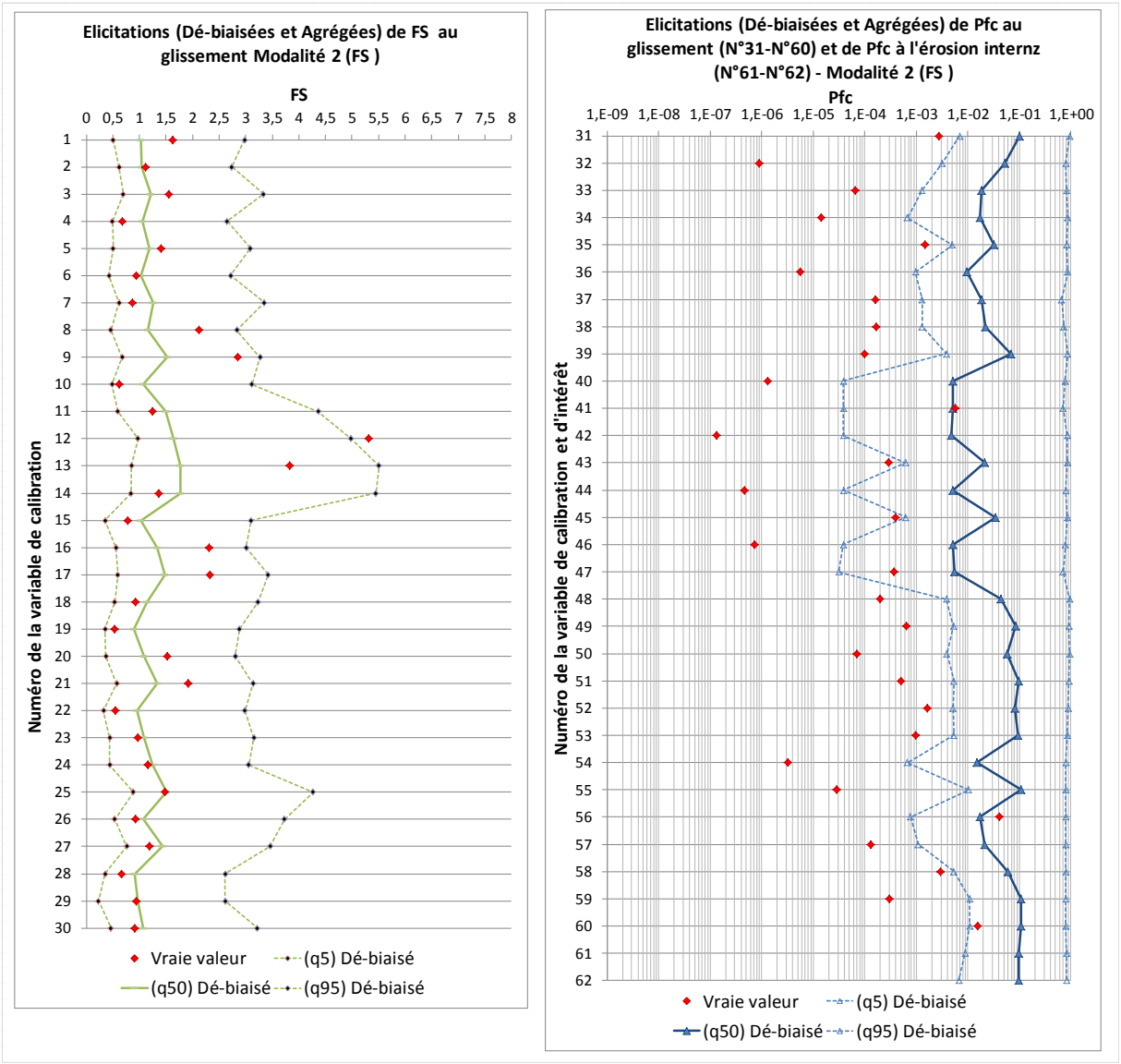


Figure 9-10. Distributions agrégées des avis experts dé-biaisés selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » dont les variables de calibration sont les variables de calibration déterministes (Fs)

Analyse des élicitations brutes dé-biaisées et agrégées du panel d'experts par rapport à la justesse :

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 60% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 37% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
  - 3% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].

- **D'après le graphique de la variable de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
    - 86% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
    - 7% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
    - 7% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
    - 0% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles des variables de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Nous remarquons que les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (FS) au glissement présentent une tendance à la sous-confiance, car 60% des vraies valeurs de variables de calibration se concentrent dans le deuxième intervalle d'incertitude [5%, 50%]. Ce panel d'experts a donc donné des valeurs élevées de la variable de calibration (FS). Aussi, les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (P_{fc}) au glissement présentent une tendance à la sous-confiance, car 86% des vraies valeurs de variables de calibration se concentrent dans le premier intervalle d'incertitude [0%, 5%].

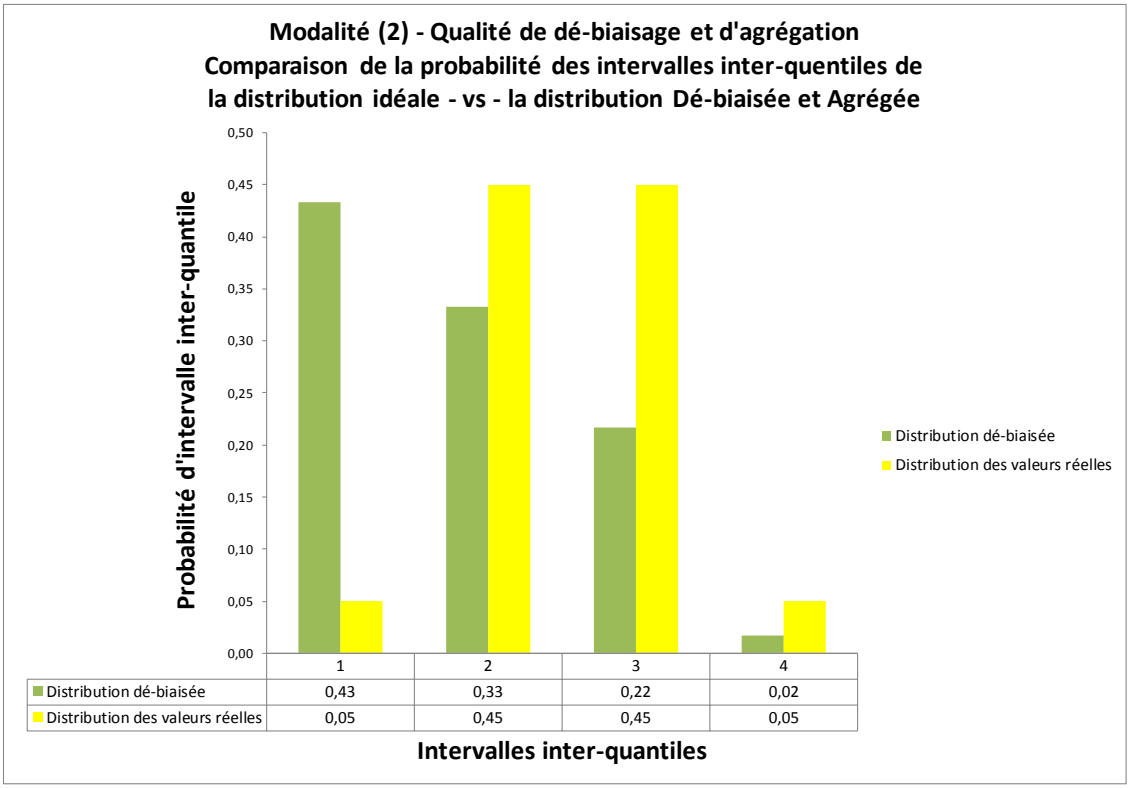
Analyse des élicitations brutes dé-biaisée et agrégées du panel d'experts par rapport à la précision (largeur des intervalles d'incertitude) :

- **Les élicitations expertes calibrées et agrégées des variables de calibration (FS) au glissement** donnent comme score d'entropie (mesure de la précision) une valeur de 0.15 ;
- **Les élicitations expertes calibrées et agrégées des variables de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) au glissement** donnent comme score d'entropie (mesure de la précision) une valeur de 1.12 ;
- **Les élicitations expertes données sur les variables de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** donnent comme score d'entropie (mesure de la précision) une valeur de 0.47 ;

Nous notons que les élicitations des intervalles d'incertitude du panel d'experts sur les variables de calibration (FS) et la variable d'intérêt des (P_{fc}) à l'érosion interne présentent une tendance à la sous-confiance et que ces intervalles d'incertitude sont larges.

Pour pouvoir évaluer la qualité du résultat final de dé-biaisage et d'agrégation, nous procédons au calcul des probabilités des intervalles interquantiles finaux (distributions dé-biaisées et agrégées), puis nous comparons ces résultats aux valeurs cibles (5%, 45%, 45%, 5%). Le graphique suivant (Figure 9-11) illustre cette comparaison pour la 2ème modalité d'application dont les variables de calibration sont les variables de calibration déterministes (FS).

Nous remarquons l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'obtenir de distributions probabilistes proches de la distribution des valeurs réelles (5% ; 45% ; 45% ; 5%).



	1	2	3	4
Distribution dé-biaisée	0,43	0,33	0,22	0,02
Distribution des valeurs réelles	0,05	0,45	0,45	0,05

Figure 9-11. Qualité de dé-biaisage et d'agrégation présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée et agrégée vs la distribution idéale selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Malgré le fait que le calcul itératif conduit à obtenir une distribution dé-biaisée des variables de calibration sur P_{fc} (c'est-à-dire, avec des probabilités interquantiles proches des valeurs cibles 5%, 45%, 45%, 5%), le résultat obtenu n'apparait pas entièrement satisfaisant car :

- Les intervalles d'incertitude obtenus sont très larges ;
- La majorité des vraies valeurs de variable de calibration P_{fc} au glissement se concentrent « à gauche » du quantile 50%.

Résultats d'agrégation des élicitations brutes dé-biaisées du panel d'experts selon la 3ème modalité

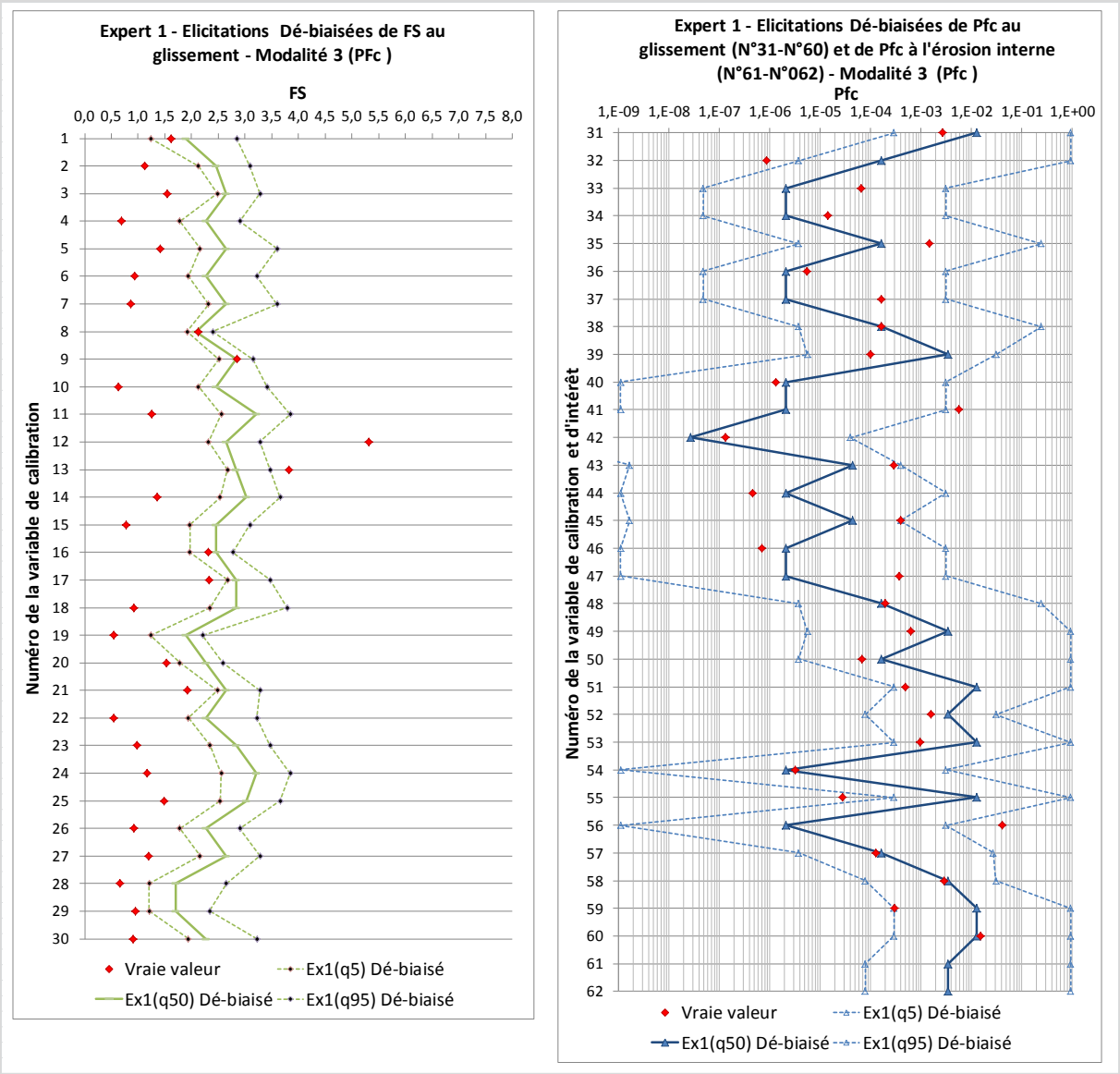


Figure 9-12. Distributions agrégées des avis experts dé-biaisés selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » dont les variables de calibration sont les variables de probabilistes (P_{fc})

Analyse des élicitations brutes dé-biaisées et agrégées du panel d'experts par rapport à la justesse :

- **D'après le graphique de la variable de calibration (FS) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 83% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 10% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 7% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;

  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **D'après le graphique de la variable de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) au glissement,** nous constatons une répartition des vraies valeurs (calculées par modélisation numérique) de la façon suivante :
  - 7% dans l'intervalle d'incertitude [0%,5%] ;
  - 53% dans l'intervalle d'incertitude [5%, 50%] ;
  - 40% dans l'intervalle d'incertitude [50%, 95%] ;
  - 0% dans l'intervalle d'incertitude [95%, 100%].
- **L'évaluation de la justesse pour les probabilités de défaillance conditionnelles des variables de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** n'est pas possible car nous ne disposons pas de vraies valeurs (calculées par modélisation numérique).

Nous remarquons que les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (FS) au glissement présentent une tendance à la sur-confiance, car 83% des vraies valeurs de variables de calibration se concentrent dans le premier intervalle d'incertitude [0%, 5%]. Ce panel d'experts a donc donné des valeurs élevées des variables de calibration (FS). Aussi, les élicitations du panel d'experts sur les variables de calibration (P_{fc}) au glissement présentent une tendance à la sous-confiance, car 60% des vraies valeurs de variables de calibration se concentrent dans les deux premiers intervalles d'incertitude [0%, 5%] et [5%, 50%].

Analyse des élicitations brutes dé-biaisée et agrégées du panel d'experts par rapport à la précision (largeur des intervalles d'incertitude) :

- **Les élicitations expertes calibrées et agrégées des variables de calibration (FS) au glissement** donnent comme score d'entropie (mesure de la précision) une valeur de 0.12 ;
- **Les élicitations expertes calibrées et agrégées des variables de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) au glissement** donnent comme score d'entropie (mesure de la précision) une valeur de 3.43 ;
- **Les élicitations expertes données sur les variables de calibration ($\mathbf{P_{fc}}$) à l'érosion interne** donnent comme score d'entropie (mesure de la précision) une valeur de 1.99 ;

Nous notons que les élicitations des intervalles d'incertitude du panel d'experts sur les variables de calibration (FS) au glissement présentent une tendance à la sous-confiance et que ces intervalles d'incertitude sont larges. Aussi, les élicitations des intervalles d'incertitude du panel d'experts sur les variables de calibration (P_{fc}) au glissement et la variable d'intérêt (P_{fc}) à l'érosion interne présentent une tendance à la sur-confiance et ces intervalles d'incertitude sont étroits.

Pour pouvoir évaluer la qualité du résultat final de dé-biaisage et d'agrégation, nous procédons au calcul des probabilités des intervalles interquantiles finaux (distributions dé-biaisées et agrégées), puis nous comparons ces résultats aux valeurs cibles (5%, 45%, 45%, 5%). Le graphique suivant (Figure 9-13) illustre cette comparaison pour la 3ème modalité d'application dont les variables de calibration sont les variables de calibration probabiliste (P_{fc}).

Nous remarquons l'effet favorable de la phase de dé-biaisage permettant d'obtenir de distributions probabilistes proches de la distribution des valeurs réelles (5% ; 45% ; 45% ; 5%).

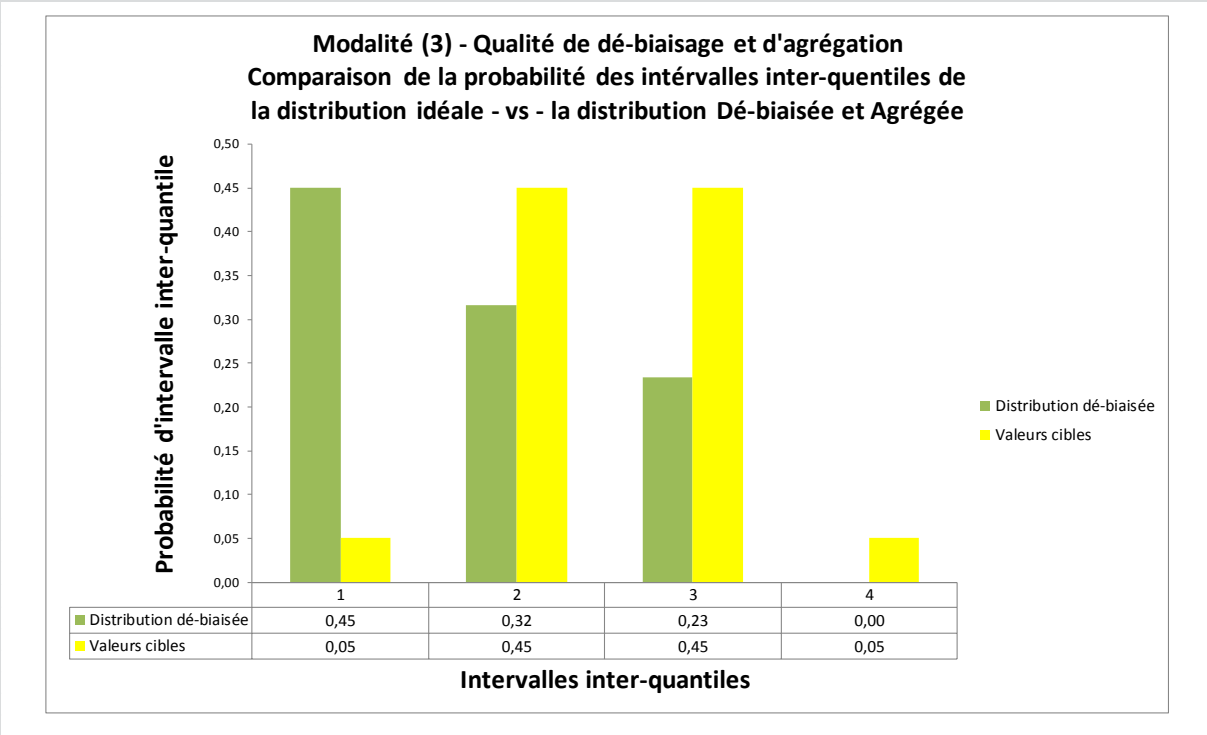


Figure 9-13. Qualité de dé-biaisage et d'agrégation présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée et agrégée vs la distribution idéale selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les (P_{fc})

Malgré le fait que le calcul itératif conduit à obtenir une distribution dé-biaisée des variables de calibration sur P_{fc} (c'est-à-dire, avec des probabilités interquantiles proches des valeurs cibles 5%, 45%, 45%, 5%), le résultat obtenu n'apparait pas entièrement satisfaisant car :

- Les intervalles d'incertitude obtenus sont très larges ;
- La majorité des vraies valeurs de variable de calibration FS au glissement se concentrent « à gauche » du quantile 50%.

9.1.3.3 **Conclusion**

Les principales conclusions de la phase d'agrégation de l'approche « EiDA » sont les suivantes :

1. La phase d'agrégation permet de rassembler mathématiquement les avis experts bruts dé-biaisés sous forme probabiliste identique à la forme initiale de la phase d'élicitation. Nous conservons ainsi les marges d'incertitude sur l'information produite

2. La phase d'agrégation de l'approche « EiDA » accorde un poids identique à tous les avis experts bruts dé-biaisés du panel.

9.2 Comparaison des modalités

L'objectif est de comparer les résultats finaux - issus de la mise en œuvre de l'approche « EiDA » selon les trois modalités d'application - par rapport à la répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude dé-biaisé. Le Tableau 9-7 présente par rapport au facteur de sécurité (FS) et à la probabilité conditionnelle de défaillance (P_{fc}) la comparaison des résultats finaux issus des trois modalités d'application de l'approche « EiDA ».

Tableau 9-7. Comparaison des résultats issus de la mise en œuvre de l'approche « EiDA » selon des trois modalités d'application et par rapport à la répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude dé-biaisé

	FS	P_{fc}
1ère Modalité	Concentration des vraies valeurs de variable de calibration « à droite » du quantile 50%	Concentration des vraies valeurs de variable de calibration « à gauche » du quantile 50%
2ème Modalité	Bonne répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude [5%, 95%] et sur les deux côtés du quantile 50%	Concentration des vraies valeurs de variable de calibration « à gauche » du quantile 50%
3ème Modalité	Concentration des vraies valeurs de variable de calibration « à gauche » du quantile 50%	Bonne répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude [5%, 95%] et sur les deux côtés du quantile 50%

Nous notons que l'approche « EiDA » est sensible au type de variable de calibration utilisé pour la déterminer les coefficients de correction des avis experts. Dès lors, afin d'obtenir une bonne répartition des vraies valeurs de variables de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude [5%, 95%] dé-biaisé et sur les deux côtés du quantile 50%, il est préférable d'utiliser :

- des variables de calibration déterministe (les facteurs de sécurité – FS) lors d'un traitement des variables d'intérêt déterministes.
- des variables de calibration probabiliste (les probabilités conditionnelles de défaillance– P_{fc}) lors d'un traitement des variables d'intérêt probabilistes.

Nous en concluons donc que pour le domaine des digues et dans un objectif d'évaluer des variables d'intérêt probabilistes, il est préférable de privilégier les variables de calibration probabilistes (3ème modalité d'application).

9.3 Conclusion générale de l’approche « EiDA »

Les principales conclusions générales de l’approche « EiDA » sont les suivantes :

1. L’approche « EiDA » permet de caractériser de manière globale les biais manifestés lors d’une phase d’élicitation par rapport aux coefficients de correction calculés. Les meilleurs avis experts sont les avis ayant des coefficients de correction proche de 1 ;
2. L’approche « EiDA » permet de caractériser quantitativement la tendance de chaque élicitation à la sur-confiance ou à la sous-confiance relativement à la valeur centrale et à l’intervalle d’incertitude ;
3. L’application de l’approche « EiDA » est relativement longue puisqu’il faut dé-biaiser individuellement les avis experts de tout le panel.

10 Comparaison des approches « EiCAD » et « EiDA »

L'objectif de ce chapitre est d'appliquer les résultats obtenus (poids de calibration et coefficient de dé-biaisage) issus d'« EiCAD » et les résultats obtenus (coefficients de dé-biaisage) issus d'« EiDA » sur des variables d'intérêt dont les vraies valeurs sont inconnues. Dans notre recherche les variables d'intérêt correspondent aux probabilités conditionnelles de défaillance (P_{fc}) relatives au mécanisme d'érosion interne.

10.1 Comparaison quantitative des approches « EiCAD » et « EiDA » selon les modalités d'application

L'objectif est d'effectuer une comparaison quantitative entre les résultats issus des trois modalités d'application des approches « EiCAD » et « EiDA ». Pour effectuer cette comparaison, nous proposons d'évaluer par le modèle de calibration de Cooke (1991) la justesse et la précision des résultats obtenus (distributions probabilistes finales) issus de chaque modalité. Le principe consiste à évaluer pour chaque distribution finale calibrée, agrégée et dé-biaisée sa justesse et sa précision afin de déterminer son poids de calibration final. Les démarches mathématiques utilisées pour la mise en œuvre de cette comparaison sont identiques à celles expliquées précédemment pour la mise en œuvre de la phase de calibration des avis experts. Le Tableau 10-1, le Tableau 10-2 et le Tableau 10-3 présentent les résultats de comparaison quantitative issue de l'application de la calibration sur le résultat final obtenu par chaque modalité.

Pour la 1ère modalité d'application

Le Tableau 10-1 présente une comparaison entre les scores de calibration et d'entropie et les poids de calibration obtenus issus de la mise en œuvre des approches « EiCAD » et « EiDA » selon la 1ère modalité d'application :

Tableau 10-1. Comparaison de score de calibration, de score d'entropie et poids de calibration issus de la 1ère modalité d'application des approches « EiCAD » et « EiDA »

	Score de calibration C	Score d'entropie K	Pois de calibration W
EiCAD (Modalité 1)	1	0.03	0.03
EiDA (Modalité 1)	1	0.40	0.40

Le résultat montre que dans le cas où les variables de calibration utilisées sont des facteurs de sécurité (FS) et des probabilités de défaillance conditionnelles (P_{fc}), il préférable de dé-biaiser les avis experts avant de les agréger.

Pour la 2ème modalité d'application

Le Tableau 10-2 présente une comparaison entre les scores de calibration et d'entropie et les poids de calibration obtenus issus de la mise en œuvre des approches « EiCAD » et « EiDA » selon la 2ème modalité d'application :

Tableau 10-2. Comparaison de score de calibration, de score d'entropie et poids de calibration issus de la 2ème modalité d'application des approches « EiCAD » et « EiDA »

	Score de calibration C	Score d'entropie K	Pois de calibration W
EiCAD (Modalité 2)	1	0.02	0.02
EiDA (Modalité 2)	1	0.08	0.08

Le résultat montre que dans le cas où les variables de calibration utilisées sont des facteurs de sécurité (FS), il préférable de dé-biaiser les avis experts avant de les agréger.

Pour la 3ème modalité d'application

Le Tableau 10-3 présente une comparaison entre les scores de calibration et d'entropie et les poids de calibration obtenus issus de la mise en œuvre des approches « EiCAD » et « EiDA » selon la 3ème modalité d'application :

Tableau 10-3. Comparaison de score de calibration, de score d'entropie et poids de calibration issus de la 3ème modalité d'application des approches « EiCAD » et « EiDA »

	Score de calibration C	Score d'entropie K	Pois de calibration W
EiCAD (Modalité 3)	1	0.13	0.13
EiDA (Modalité 3)	1	0.08	0.08

Le résultat montre que dans le cas où les variables de calibration utilisées sont des probabilités de défaillance conditionnelles (P_{fc}), il préférable d'agréger les avis experts avant de les dé-biaiser.

En synthèse, nous notons que dans cette comparaison quantitative, la répartition des vraies valeurs de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude dé-biaisé [5%, 95%] n'est

pas prise en compte. En effet, il suffit d'avoir une bonne réparation des vraies valeurs de variable de calibration sur l'intervalle d'incertitude dé-biaisé issue d'un seul type de variable de calibration pour obtenir un score de calibration optimal et par conséquent un poids de calibration optimal. Cette comparaison quantitative n'a pas permis de détecter la sensibilité des approches « EiCAD » et « EiDA » au type de variable de calibration utilisé.

Dès lors, afin d'obtenir une bonne répartition des vraies valeurs de variables de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude [5%, 95%] dé-biaisé et sur les deux côtés du quantile 50%, il est préférable d'utiliser :

- des variables de calibration déterministe (les facteurs de sécurité – FS) lors d'un traitement des variables d'intérêt déterministes ;
- des variables de calibration probabiliste (les probabilités conditionnelles de défaillance– P_{fc}) lors d'un traitement des variables d'intérêt probabilistes.

In fine, nous en concluons que pour le domaine des digues et dans un objectif d'évaluer des variables d'intérêt probabilistes, il est préférable de privilégier les variables de calibration probabilistes (3ème modalité d'application).

10.2 Application d' « EiCAD » et d'« EiDA » sur les variables d'intérêt

10.2.1 Application de l'approche « EiCAD »

Issu de la mise en œuvre de l'approche « EiCAD » selon la 3ème modalité d'application, nous appliquons à notre étude de cas les résultats obtenus (poids de calibration et coefficients de correction) sur les variables d'intérêt « probabilité conditionnelle de défaillance vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne ». Les résultats en termes d'intervalle d'incertitude dé-biaisée et de probabilité conditionnelle de défaillance plus vraisemblable dé-biaisée sont présentés ci-dessous par rapport à chaque tronçon de la digue de cas d'étude :

Probabilité conditionnelle de défaillance du **Tronçon 1** **du P85 au P118**	
La probabilité conditionnelle de défaillance par le mécanisme de rupture l'**érosion interne** est de $1.7 * 10^{-3}$, avec un intervalle d'incertitude [5% - 95%] de $1.7 * 10^{-4}$ à $6.2 * 10^{-1}$	

Probabilité conditionnelle de défaillance du
Tronçon 2
du P118 au P125

La probabilité conditionnelle de défaillance par le mécanisme de rupture l'**érosion interne** est de 0.

La hauteur de la ligne d'eau pour une crue de période de retour 500 est très basse et ne provoque pas d'un écoulement dans le corps de la digue.
$(i_{global} = 1)$

Probabilité conditionnelle de défaillance du
Tronçon 3
du P125 au P142

La probabilité conditionnelle de défaillance par le mécanisme de rupture l'**érosion interne** est de $1.7 * 10^{-3}$, avec un intervalle d'incertitude [5% - 95%] de $1.7 * 10^{-4}$ à $6.2 * 10^{-1}$

10.2.2 Application de l'approche « EiDA »

Issu de la mise en œuvre de l'approche « EiDA » selon la 3ème modalité d'application, nous appliquons à notre étude de cas les résultats obtenus (poids de calibration et coefficients de correction) sur les variables d'intérêt « probabilité conditionnelle de défaillance vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne ». Les résultats en termes d'intervalle d'incertitude dé-biaisée et de probabilité conditionnelle de défaillance plus vraisemblable dé-biaisée sont présentés ci-dessous par rapport à chaque tronçon de la digue de cas d'étude :

Probabilité conditionnelle de défaillance du **Tronçon 1** **du P85 au P118**	
La probabilité conditionnelle de défaillance par le mécanisme de rupture l'**érosion interne** est de $3.5 * 10^{-3}$, avec un intervalle d'incertitude [5% - 95%] de $7.9 * 10^{-5}$ à $9.5 * 10^{-1}$	

Probabilité conditionnelle de défaillance du
Tronçon 2
du P118 au P125

La probabilité conditionnelle de défaillance par le mécanisme de rupture l'**érosion interne** est de0.

La hauteur de la ligne d'eau pour une crue de période de retour 500 est très basse et ne provoque pas d'un écoulement dans le corps de la digue.
$(i_{global} = 1)$

Probabilité conditionnelle de défaillance du
Tronçon 3
du P125 au P142

La probabilité conditionnelle de défaillance par le mécanisme de rupture l'**érosion interne** est de $3.5 * 10^{-3}$, avec un intervalle d'incertitude [5% - 95%] de $7.9 * 10^{-5}$ à $9.5 * 10^{-1}$

10.2.3 Comparaison des approches « EiCAD » et « EiDA »

Le Tableau 10-4 résume les résultats obtenus relatifs à la variable d'intérêt « la probabilité de défaillance conditionnelle (P_{fc}) vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne ».

Tableau 10-4. Tableau de comparaison de résultats issus de l'application d'EiCAD et d'EiDA sur la variable d'intérêt « mécanisme de rupture par érosion interne »

	EiCAD	EiDA
Tronçon 1	$1.7 * 10^{-3}$	$4.8 * 10^{-3}$
	$[1.7 * 10^{-4} \quad ; \quad 9.5 * 10^{-1}]$	$[9.4 * 10^{-5} \quad ; \quad 7.3 * 10^{-1}]$
Tronçon 2	0	0
	---	---
Tronçon 3	$1.7 * 10^{-3}$	$4.2 * 10^{-3}$
	$[1.7 * 10^{-4} \quad ; \quad 9.5 * 10^{-1}]$	$[8.1 * 10^{-5} \quad ; \quad 8.2 * 10^{-1}]$

10.2.4 Discussion

Concernant la valeur centrale et l'intervalle d'incertitude ; nous constatons que les deux approches « EiCAD » et « EiDA » appliquées à notre étude de cas conduisent au même ordre de grandeur pour la variable d'intérêt « la probabilité de défaillance conditionnelle (P_{fc}) vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne », ce qui tend à valider les démarches proposées. Cette conclusion est à ce stade à valider sur d'autres études de cas et d'autres variables d'intérêt.

10.3 Analyse inter-comparée des approches

Nous présentons à travers le Tableau 10-5 une analyse inter-comparée des approches « EiCAD » et « EiDA » développées dans cette recherche pour le domaine des digues fluviales (cf. chapitre 8 et chapitre 9) :

Tableau 10-5. Comparaison inter-comparée des approches développées

	EiCAD	EiDA
Phases		
Phase d'élicitation (Ei)	Formulaire de questionnement pour les variables de calibration et pour les variables d'intérêt	
Phase de calibration (C)	Modèle de Cooke (1991) Obtention d'un poids de pondération des avis experts du panel	---
Phase d'agrégation (A)	Modèle de Lichtendahl et al. (2013) Obtention d'une moyenne des avis experts pondérés par le poids de calibration	Modèle de Lichtendahl et al. (2013) Obtention d'une moyenne des avis experts
Phase de dé-biaisage (D)	Modèle de Clemen et Lichtendahl (2002) Obtention des coefficients de correction pour l'ensemble d'avis du panel d'experts se déterminant par *calcul itératif*	Modèle de Clemen et Lichtendahl (2002) Obtention des coefficients de correction pour chaque avis expert du panel d'experts se déterminant par *calcul itératif*
Variables de calibration et variables d'intérêt		
Variable de calibration	- Facteurs de sécurité au glissement (FS) - Probabilité de défaillance conditionnelle (P_{fc}) au glissement	
Variable d'intérêt	- Probabilité de défaillance conditionnelle (P_{fc}) à l'érosion interne, à l'affouillement et à la surverse	
Résultats		
Résultat final	Distribution probabiliste sous forme d'intervalle d'incertitude contenant, une borne inférieure (valeur minimale – quantile 5%), une valeur centrale (valeur plus vraisemblable – quantile 50%), et une borne supérieure (valeur maximale – quantile 95%) $[q_{5\%},\quad q_{50\%},\quad q_{100\%}]$	
Durée de la mise en œuvre	Courte La phase dé-biaisage se fait sur une seule distribution calibrée	Longue La phase de dé-biaisage se fait sur chaque distribution

	EiCAD	EiDA
	et agrégée des avis experts	individuelle brute des avis experts
Qualité du résultat	- Dépend de la qualité des élicitations expertes ; - L'approche « EiDA » est plus conservatrice que l'approche « EiCAD » puisqu'elle donne des valeurs plus élevées de probabilités conditionnelles de défaillance.	
Points forts		
Phase de calibration	▪ Pondérer les avis de chaque expert du panel via un poids de calibration	
Phase de dé-biaisage	▪ Identifier des coefficients de correction pour l'avis du panel d'experts.	▪ Identifier des coefficients de correction pour chaque avis expert du panel.
	▪ Les coefficients de correction reflètent la tendance de l'avis du panel d'experts à la sur-confiance ou à la sous-confiance.	▪ Les coefficients de correction reflètent la tendance de l'avis de chaque expert du panel à la sur-confiance ou à la sous-confiance.
Application	▪ La démarche pourrait être appliquée dans plusieurs domaines de génie civil où le recours au jugement expert est la seule source pour l'obtention d'informations fiables dans un contexte incertain.	
Points faibles		
Phase de calibration	La phase de calibration des vais experts conduit pratiquement à retenir l'avis expert ayant eu de poids de calibration le plus fort et, de ce fait négliger les avis d'autres experts du panel.	Les bons et les mauvais avis experts ont le même poids.
Phase de dé-biaisage	Les intervalles d'incertitude finaux sont larges et peu précis. Néanmoins les intervalles d'incertitudes finaux issus de l'approche « EiCAD » sont moins larges (plus précis) que ceux issus de l'approche « EiDA »	

CONCLUSION

Les digues fluviales sont des ouvrages à grands linéaires dont le rôle est d'empêcher la venue d'eaux dans des espaces urbanisées. Elles représentent des ouvrages d'une importance stratégique pour la sécurité des personnes et des biens. Les questions liées à leur sécurité, leur performance et leur fiabilité - vis-à-vis des aléas des crues et de submersion- représentent une problématique scientifique plus que jamais d'actualité, face à l'extension des villes et les incertitudes du changement climatique. Dans ce cadre et compte tenu des exigences de sécurité de la société civile, la réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques a été renforcée par le décret du 11 décembre 2007. Il impose aux gestionnaires d'ouvrages hydrauliques la réalisation de diagnostics périodiques et d'études de dangers intégrant l'évaluation probabiliste de leur sécurité et de leur fiabilité structurelle. Or dans le domaine des digues, les difficultés liées au manque de données, aux incertitudes associées à ces données et aux modèles d'états-limites liés aux mécanismes de rupture, freinent la possibilité d'utiliser des méthodes statistiques et probabilistes quantitatives d'analyse de fiabilité. De fait l'expertise reste l'approche privilégiée pour l'évaluation de la fiabilité structurelle de ces ouvrages.

Dans ce contexte, notre recherche a consisté à développer une démarche d'aide à l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales en termes de probabilité de défaillance à partir du jugement d'expert. Il s'agit de proposer une démarche complète pour le recueil, l'exploitation et le traitement des biais experts (notamment le biais de sur-confiance et sous-confiance) susceptibles d'entacher le jugement expert.

Sur le plan scientifique, notre première famille de résultats concerne le développement de démarches d'élicitation des avis experts via l'élaboration et la mise en œuvre d'un formulaire de questionnement relatif à la sécurité des digues. Il contient deux types de fiches : 1) une première fiche déterministe permettant d'évaluer, à partir du jugement d'expert, un facteur de sécurité vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement et, 2) une deuxième fiche probabiliste permettant d'évaluer, à partir du jugement d'expert, une probabilité de défaillance vis-à-vis des mécanismes de rupture par glissement et par érosion.

Les éléments de chaque fiche correspondent aux caractéristiques géométriques, géotechniques et hydrauliques relatives aux profils de la digue à évaluer. Le formulaire développé apporte une aide à l'expert pour évaluer la fiabilité structurelle des profils sous forme probabiliste en prenant en compte les incertitudes sur les données d'entrée. La forme probabiliste de l'évaluation experte correspond à un intervalle d'incertitude qui se compose respectivement des trois quantiles 5%, 50% et 95%. Le quantile 5% et le quantile 95% forment l'intervalle d'incertitude du jugement expert et le quantile 50% représente la valeur la plus vraisemblable à laquelle l'expert accorde confiance.

Notre deuxième famille de résultats s'intéresse à l'élaboration d'une démarche complète d'évaluation de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement expert. Elle

comporte une démarche d'adaptation au contexte de génie civil des protocoles et des méthodes issus du domaine économique et statistique permettant l'élicitation, la calibration, l'agrégation et le dé-biaisage des avis experts incertains. L'adaptation de ces méthodes présente plusieurs aspects innovants dans le domaine du génie civil et plus particulièrement pour les digues : 1) la pondération et la caractérisation des évaluations expertes selon leur tendance de précision et de justesse, ce qui donne une idée globale de leurs biais, 2) la prise en compte simultanément des avis de plusieurs experts, 3) l'identification quantitative de la tendance des élicitations expertes d'un expert ou d'un panel d'experts à la sur-confiance et/ou à la sous-confiance relativement aux intervalles d'incertitude et aux valeurs centrales et, 4) la correction et le dé-biaisage des avis experts par des coefficients de correction spécifiques déterminés par calcul itératif.

Dans un cadre applicatif au domaine des digues, nous avons proposé deux combinaisons d'approche : « **EiCAD** » et « **EiDA** ». La première combinaison « EiCAD » correspond à une approche qui prévoit l'**E**licitation **i**ndividuelle, la **C**alibration, l'**A**grégation et le **D**é-biaisge des avis experts. La seconde combinaison « EiDA » prévoit l'**E**licitation **i**ndividuelle, le **D**é-biaisage et l'**A**grégation des avis experts. Ce qui différencie l'une par rapport à l'autre est que l'agrégation des avis experts dans « EiCAD » se réalise par une moyenne pondérée tandis que l'agrégation des avis experts dans « EiDA » se réalise par une moyenne simple des avis experts dé-biaisées.

A l'issu de ces propositions et du développement de ces deux approches, nous avons conduit leur mise en œuvre sur un cas de digue en remblai homogène. L'analyse critique des résultats obtenus montre que :

1) les approches apportent une aide pour le recueil les avis expert sous forme probabiliste et permettent de prendre en compte les incertitudes du contexte d'étude;
2) l'approche « EiCAD » permet d'identifier la tendance collective des élicitations d'un panel d'experts à la sous-confiance ou à la sur-confiance. L'approche « EiDA » permet d'identifier la tendance individuelle des élicitations de chaque expert à la sous-confiance ou à la sur-confiance ;
3) les approches permettent de traiter quantitativement les biais experts (notamment le biais de sur-confiance et sous-confiance) par le calcul des coefficients de correction ;
4) les approches sont sensibles aux variables de calibration utilisées pour leur mise en œuvre. Il est donc préférable que les variables de calibration soient du même type que les variables d'intérêt.

Au final, nous avons proposé par les approches développées une démarche complète pour l'aide à l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des digues fluviales à partir du jugement d'expert en contexte de données incertaines et de mécanismes de défaillance complexes. Les approches développées ont montré leur intérêt pour l'évaluation probabiliste de la fiabilité structurelle des tronçons d'une digue vis-à-vis des différents mécanismes de rupture et pour plusieurs scénarios de crue. Les résultats issus des approches développées permettent de guider le choix des actions techniques ou des travaux destinés à améliorer la performance et la sécurité d'un tronçon de digue.

Dans un cadre plus large d'utilisation, les approches développées pourraient être transposables à d'autres ouvrages de génie civil pour lesquels peu de données fiables sont disponibles, afin de conduire une analyse quantitative de fiabilité nécessitant le recours au jugement expert. En Effet, les approches développées aux digues peuvent être étendues à d'autres ouvrages avec des ajustements spécifiques à chaque catégorie d'ouvrages de génie civil. Elles correspondent à des approches ouvertes pour lesquelles les protocoles d'élicitation, de calibration, d'agrégation et de dé-biaisage pourraient être adaptés et modifiées au contexte de nouvelles études et domaine. L'enjeu est d'identifier des variables d'intérêt et de calibration pertinentes relatives à l'ouvrage à évaluer et d'adapter par la suite le formulaire de questionnement relativement aux données disponibles sur l'ouvrage puis lancer l'application des approches développées. Toutes fois le formulaire de recueil des avis experts devrait contenir pratiquement beaucoup de fiches à évaluer par les experts, ce qui rende la tâche d'élicitation longue et fastidieuse à réaliser.

Des perspectives de recherche sont apparues au cours de notre travail et pourraient être engagées à différentes échéances :

1) Appliquer et adapter les deux approches développées « EiCAD » et « EiDA » à d'autres cas d'étude de digues afin d'évaluer autres mécanismes de rupture comme l'affouillement et la surverse. Ce point constitue un axe de recherche pertinent dans le domaine des digues puisque les mécanismes de rupture par affouillement et par surverse sont aussi des mécanismes pour lesquels l'évaluation d'une probabilité de défaillance des digues se fait par jugement d'expert ;
2) Identifier, adapter et tester autres variables de calibration pertinentes pour les digues et permettant la mise en œuvre des approches développées « EiCAD » et « EiDA ».
3) Tester une autre combinaison d'approche possible d'élicitation et de traitement du jugement expert basée sur l'élicitation collective ou consensuelle d'un panel d'experts. Il s'agirait d'une approche qui prévoirait l'**E**licitation **c**onsensuelle du panel d'experts (Ec) suivie d'une **D**é-biaisage de cette élicitation consensuelle (D). Ce point constitue un axe de recherche pertinent dans le domaine des digues car l'utilisation du jugement expert consensuel est fréquente dans l'évaluation de sécurité des digues fluviales.
4) Renforcer les méthodes de calibration et de dé-biaisage des avis experts utilisées dans les approches développées « EiCAD » et « EiDA » par des modèles statistiques bayésiens permettant d'affiner le traitement des incertitudes et des biais experts. Ce point constitue un axe de recherche particulièrement pertinent dans le domaine des digues et du génie civile, où l'expertise tient un rôle essentiel ;
5) Prévoir l'extension et l'application des approches développées sur une échelle plus grande que l'échelle de l'ouvrage lui-même, à l'échelle du territoire. Cela pourrait permettre d'évaluer (par la fiabilité structurelle de chaque système) l'impact de la défaillance d'un des systèmes constitutifs de la ville au fonctionnement des autres systèmes. Dans ce cas-là, le jugement expert représente un outil pertinent pour rassembler, traiter et trouver des liens entre les différents types de données disponibles, afin de pouvoir contribuer à évaluer la vulnérabilité urbaine face aux aléas naturels.

BIBLIOGRAPHIE

Armstrong SJ, ed. (2001). Combining forecasts. Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners (Kluwer Academic, Norwell, MA), 417–439.

Au, S., Beck, J.L. (2001). «Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation». Probabilistic Engineering Mechanics 16, 14p: 263-277.

Arnott, D. (2002). Decision biases and decision support systems development (Working Paper. No. 2002/04). Melbourne, Australia: Decision Support Systems Laboratory, Monash University.

Association française de normalisation. (2003). *Eurocodes structuraux : bases de calcul des structures*. AFNOR.

Aven, T. (2010) Some reflections on uncertainty analysis and management. Reliability Engineering & System Safety, 95(3) :195–201, March.

Banton O. et Bangoy L. M. (1997) **:** Hydrogéologie : Multi-science environnementale des eaux souterraines. Université du Québec / AUPELF, 460p.

Bateson, G. (1979). «*Mind and Nature: a necessary unity*». Bantam Books, New-York.

Boissier, D., Al-Hajjar, J. (1993). "Système interactif d'aide à la décision (SIAD) et incertain en génie civil ". *EUROPIA'93* Delft , 21-24 juin 1993.

Bouchon-Meunier, B. (1995). *La logique floue et ses applications*. Addison-Wesley, 254p.

Boyd, D.W. & Regulinski, S.G. (1979). *Characterizing uncertainty in technology cost and performance.* Decision Focus, Inc. Report III4

Bottom, W., Lakha, K. & Miller, G. J. (2002). Propagation of individual bias through group judgment: error in the treatment of asymmetrically informative signals. Journal of Risk and Uncertainty, 25, 147-163.

Burns, Zach., Chiu, Andrew., Wu, George. (2010). Overweighting of Small Probabilities, Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, 19 p.

Camerer, C. F., and Hogarth R. (1999). "The effects of financial incentives in experiments: A review and capital-labor-production framework,"Journal of Risk and Uncertainty19, 7-42.

Carvajal, C. (2009). *Evaluation probabiliste de la sécurité structurale des barrages-poids* (Doctoral dissertation, Univerité Blaise Pascal, Clermont-Ferrand).

Castany, G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Université de Pierre et Marie Crue (Paris VI), 233p.

CEA (2000). A Guide to Dam Risk Management. Canadian Electricity Association – Dam Safety Interest Group, December 2000. Revision 8.0.

Christensen, H.C (1987). "Evaluation of research Programmes", dans E. Ormala (éd.) Evaluation of Technical Research and Development , pp. 88-108, Espoo, Nordforsk

CITY ATLAS, "*Manhattan 2014 : back and geting bigger than ever*", sur http://newyork.thecityatlas.org/lifestyle/manhattan-2014-back-and-getting-bigger-than-ever-2/, consulté le 14 / 06 / 2014 à 17 h 00

Clemen, R. T. (1996). Making Hard Decisions: An Introduction to Decision Analysis (2nd edn.). Pacific Grove: Duxbury Press.

Clemen, R.T., Lichtendahl, K.C. (2002). Debiasing expert overconfidence: a Bayesian calibration model.PSAM6, San Juan, Puerto Rico

Clemen, R. T. & Reilly, T. (2001). *Making hard decisions with decision tools.* Duxbury Press, Pacific Grove, CA.

Clemen, RT., Winkler, RL. (1986). Combining economic forecasts. J. Bus. Econom. Statist. 4:39–46.

Corner, R. C., & Corner, T. R. (1994). Chi-Square Analysis. Science Teacher, 61(4), 44-47.

Cox, D. R. (1958). «Two further applications of a model for binary regression. *Biometrica*», 45 P: 562—565.

Cooke, R. (1991). «Experts in uncertainty: opinion and subjective probability in science». Oxford University Press, 336 p.

Cooke, RM et Goossens, LHJ. (2004). « Expert judgement elicitation for risk assessment of critical infrastructures ». J Risk Res ;7(6):643–56.

Den Heijer, F et F.L.M. Diermanse. (2012). Towards risk-based assessment of flood defences in the Netherlands: an operational framework, compte-rendu de la conférence FloodRisk2012 à Rotterdam, novembre.

EDD. (2012). Etude de dangers de la digue de classe A du Drac, Association Départementale Isère-Drac-Romanche, rapport final N°1361405.

Edmunson, R. (1990). « Decomposition : A strategy for judgement forecasting ». J.Forecasting, 9(4), 305-314.

Ferrell, W. R. (1985) Combining individual judgements. In G. Wright (Ed). *Behaviour decision making*. Plenum Press, New York

Field, A. P. (2000). *Discovering statistics using SPSS for Windows: Advanced techniques for the beginner*. London: Sage.

Fildes, R., Makridakis, S. (1995). The impact of empirical accuracy studies on time series analysis and forecasting. Internat. Statist. Rev. 63:289–308.

Fischhoff, B. (1982). Debiasing. In D. Kahnemen, P. Slovic and A. Tversky (Eds.), *Judgement under Uncertainty: Heuristics and Biases (*pp. 422-444). Cambridge: Cambridge University Press.

ERINOH, (2009). Caractérisation de l'érosion interne au laboratoire, rapport final axe 1 du projet national ANR sur l'ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques, 94 p. http://erinoh.lyon.cemagref.fr/

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. EN 1990: 2002. (2002) Eurocode-Basis of Structural Design. European ommittee for Standardisation, Brussels.

Fauchard, C., Mériaux, P. (2004). Méthodes géophysiques et géotechniques pour le *diagnostic des digues de protection contre les crues. Guide pour la mise en oeuvre et l'interprétation*. Cemagref Editions, 124 p.

Fong, G. T., Krantz, D. H., & Nisbett, R. E. (1986). The effects of statistical training on thinking about everyday problems, Cognitive Psychology, 18, 253–92.

Garthwait, P.H., Kadane, J.B. et O'Hagan, A. (2005). Statistical methods for eliciting probability distributions. Journal of the American statistical Association, 100, 680-701.

Harrison, J.M. (1977). «Independence and Calibration in Decision Analysis». Management Science, 24, 320-328.

Henrion, M., Fischer, G., and Mullin, T. (1993). « Divide and conquer ? Effects of decomposition on the accuracy and calibration of subjective probability distribution». Organizational Behavior Humain Decision Processes, 55(2), 207-227.

Hora, SC. (2004). Probability judgments for continuous quantities: Linear combinations and calibration. Management Sci. 50:597–604.

Hora, S., Dodd, N., et Hora, J. (1993). «The use of decomposition in probability assessments of continuous variable». J. Behavioral Decision Making, 6(2), 133-147.

Hora, J. A. & VonWinterfeldt, D. (1997). Nuclear Waste and Future Societies: A look into the deep future. *Technological Forecasting and Social Change, 56*, 153-170.

ICOLD (1993). Bulletin 93: Ageing of dams and appurtenant works - Review and *recommendations*. ICOLD, Paris, 235 p.

ICOLD (1995). *Bulletin 99: Dam failures - Statistical analysis*. ICOLD, Paris, 73.

Kahneman. D., Slovic, P., Tversky, A. (1982). «*Judgement under Uncertainty, Heuristics and Biaises*». Cambridge University Press, Cambridge.

Klayman, J., Soll, J., Gonzalez-Vallejo, C., & Barlas, S. (1999). Overconfidence: It depends on how, what, and whom you ask. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 79*, 216-247.

Kleinmuntz, D., Fennema, M., et Peecher, M. (1996). « Conditional assessment of subjective probabilities : Identifying the benefits of decomposition ». Organizational Behavior and Human Decision Processes, 66(1), 1-15.

Koehler, J., et Harvey, N. (2004). Blackwell Handbook of judgment & Decision Making, Blackwell Publishing, UK, 675p.

Krinitzsky, E.L. (1993). Earthquake probability in engineering – Part 1: The use and misuse of expert opinion. Engineering Geology, 33, 257-288.

Kullback, S. (1997). Information Theory and Statistics. Dover Publications.

Lannoy, A. (2009). Fiabilité des composants industriels : enjeux, besoins, méthodes et difficultés rencontrées. IMdR. Institut pour la maitrise des risques.

Larrick, RP. et Soll, JB. (2006). Intuitions about combining opinions: Misappreciation of the averaging principle. Management Sci. 52:111–127.

Lin, S-.W, Bier, VM. (2008). A study of expert overconfidence. Reliability Engineering & System Safety; 93(5):711–721

Lichtendahl, K.C Jr., Grushka-Cockayne, Y. et Winkler, RL. (2013). Is it better to average probabilities or quantiles? Management Sci. 59:1594–1611.

Lino, M., Mériaux, P., Royet, P. (2000). Méthodologie de diagnostic des digues appliquée *aux levées de la Loire moyenne*. Cemagref Editions, 208 p.

MacGregor, D., et Armstrong, J. (1994). «Judgment decomposition: When does it work?» Int. J. of Forecasting, 10(3), 495-506.

MacGregor, D., Lichtenstein, S., et Slovik, P. (1988). « Structuring Knowledge retrieval : An analysis of decomposition quantitative judgement ». Organizational and Human Decision Processes, 42(3), 303-323.

Mériaux, P., Royet, P., Folton, C. (2001). Surveillance, entretien et diagnostic des digues de *protection contre les inondations*. Cemagref Editions, 191 p.

Meyer, M.A., Booker. **J.M.** (1993). «Eliciting and Analyzing Expert Judgment: A practical Guide», ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability.

Mendel, M., Sheridan, T. (1989). «*Filtering information from human experts*». IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 36(1):6–16.

MEED, Ministère de l'écologie et du développement Durable (2004). Dossier d'information : les inondations, risques naturels majeurs, 24p.

Morgan, M.G. et Henrion, M. (1990). «Uncertainty - A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis», Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.

Morris, P. A. (1974). «Decision analysis expert use». *Management Science*, 20:1233—1241.

Morewedge, C. K., Yoon, H., Scopelliti, I., Symborski, C. W., Korris, J. H. & Kassam, K. (2015). Debiasing Decisions. Improved Decision Making With A Single Training Intervention. *Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences*, 51p.

Muffat, **S.** (2005). « Professionnalisation du recueil des avis d'experts pour l'analyse des risques », Note EDF HT-52/05/023/A.

NF EN 13306. (2001). Maintenance Terminology; June.

Nozer, D Singpurwalla. (2006). Reliability and Risk : A Bayesian Perspective. Wiley series in probability and statistics. John Wiley & Sons.

O'Hagan, A., Buck, C. E., Daneshkah, A., Eiser, J. R., Garthwaite, P.H., Jenkinson, D.J., Oakley, J.E., Rakow, T. (2006). *Uncetains Judgments : Eliciting Experts' Probabilities*, West Sussex, UK, 338 p.

Ortiz, N.R., Wheeler, T.A., Breeding, R. J., Hora, S., Meyer, M.A., Keeney, R.L. (1991). "*Use of Expert Judgment in NUREG-1150*" Nuclear Engineering and Design, volume 126, pp. 313-331.

Paté-Cornell, M. Elisabeth. (1996). Uncertainties in risk analysis : Six levels of treatment. Reliability Engineering & System Safety, 54(2-3) :95–111.

Peyras, L. (2010). Diagnostic et analyse de risques lié au vieillissement des barrages, Allemane, Éditeur, « Edition Universitaires européennes », 200p.

Peyras, L., Boissier, D., Carvajal, C. (2010). Analyse de risques et fiabilité des barrages : Application aux barrage-poids en béton, Éditeur, « Edition Universitaires européennes », 201p.

Pchtenstein. S., Fischhoff, B., Phillipe, L.D. (1977). Calibration of probabilities: The state of art. In: Decision making and change in human affairs. H. Jungermann & G. deZeeuw (Eds.), Amsteram : D. Reidel.

Pigeon, M. (2008). "*Utilisation d'avis d'experts en acuariat*". *Rapport de thèse*, Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences, Université de Laval, 108 p.

Pietrocatelli, S. (2008). «Analyse bayésienne et élicitation d'opinion d'experts en aanalyse de risques et particulièrement dans le cas de l'amiante chrysotile ». Mémoire de master, Université de Montréal, 110p.

Procaccia, H., Suhner, M.C. (2003). *Démarche bayésienne et applications à la sûreté de fonctionnement*, 412 p.

QUIGGIN, J. (1982). – « *A Theory of Anticipated Utility* », Journal of Economic Behavior and Organisation, 3 , p. 323-343.

Raiffa, H. (1968). Decision analysis: Introductory lectures on choices under uncertainty, Addison-Wesley, Reading, Mass.

Ranjan, R. (2009). Combining and evaluating probabilistic forecasts. Ph.D. dissertation, University of Washington, Seattle.

Ranjan, R., Gneiting, T. (2010). Combining probability forecasts. J. Roy. Statist. Soc. B. 72:71–91.

Ratcliff, R. (1979) Group reaction time distributions and an analysis of distribution statistics. Psych. Bull. 86:446–461.

Référentiel. (2015). Référentiel technique digues maritimes et fluviales, version 1 du document rédigé par le Groupe de Travail « Référentiel technique digues maritimes et fluviales », Ministère de l'écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 190p.

Sallak, M., Aguirre, F. et Schon, W. (2013). Incertitudes aléatoires et épistémiques, comment les distinguer et les manipuler dans les études de fiabilité? In QUALITA2013. Compiegne- France.

Serre, D. (2005). "Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations, modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique". Rapport de thèse, Université de Marne la Vallée, 225 p.

Sharp, M., Wallis, M., Deniaud, F., Hersch-Burdick, R., Tourment, R., Matheu, E., Seda- Sanabria, Y., Wersching, S., Veylon, G., Durand, E., Smith, P. (2013). The international Levee Handbook, C731. CIRIA, London.

Shlyakhter, A. I., Kammen, D. M., Brodio, C. L. et Wilson, R. (1994). « Quantifying the credibility of energy rojections from trends in past data: The u.s. energy sector». *Energy Policy*, 22p :119—130.

Soll, J. B. (1996). Determinants of overconfidence and miscalibration: The roles of random error and ecological structure. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 65,* 117-137.

Soll, J.B. et Klayman, J. (2003). Overconfidence in intervalle estimates. *Journal of Experimental Psychology: Learning, memory and cognition,* 30, 299-314.

Spetzler, C.S. & Stael von Holstein, C.A.S. (1975). Probability Encoding in Decision Analysis. *Management Science, 22*, 340-358.

SUDRET B. (2007). Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models. Contributions to tructural reliability and stochastic spectral methods. Rapport HDR, Université Blaise Pascal – Clermont II, octobre 2007. 182p.

Stone, M. (1961). The opinion pool. Ann. Math. Statist. 32:1339–1342.

Tetlock, P.E. (2005). *Expert Political Judgment: How good is it? How can we know?* Princeton University Press, Princeton.

Thomas, EAC., Ross, BH. (1980). On appropriate procedures for combining probability distributions with the same family. J. Math. Psych. 21:136–152.

Tourment R., BeullacB., Deniaud Y., SimmJ., Wallis M., SharpM., PohlR., Van Hemert H. (2013). De l'EDD des digues en France aux travaux de l'ILH sur les mécanismes élémentaires et les scénarios de défaillance. 2*nd* colloque national – Digues2013, MEDDTL / CFBR / Irstea, Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, Aix-en-Provence. 288-297

Tourment, R., Beullac, B., et Degoutte, G. (2015). Études de dangers des systèmes de protection contre les inondations: une méthode d'analyse de la défaillance. *La Houille Blanche*, (1), 41-55.

Tourment, R., Wallis, M., Beullac, B., Kortenhaus, A., Schaaf, D., Schelfhout, H. (2014). The risk analysis of levee systems. 3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings, Porto - Portugal

Tourment, R., Beulla, B., De Leeuw, A., Diermanse, F., Gouldby, B., Wallis, M. (2016). "L'analyse de risques des systems d'endiguement: comparaison de différentes pratiques internationals". Colloque CFBR « Sûreté des barrages et enjeux ».Chambéry, France : 15 p.

Tversky, A. et Kahneman, D. (1974). « *Judgement Under Uncertainty: Heuristics and Biases* », Science, vol. 185, p. 1124-1131.

Vick, Steven G. (1997). Dam Safety Risk Analysis : new direction. International Water Power and dam construction, May 1997, p.40-42.

Vick, Steven G. (2002). « Degrees of Belief : Subjective Probability and Engineering Judgment ». American Society of Civil Engineers. United States of America, 455p.

vonWinterfeldt, D., et Edwards, W. (1986). *Decision analysis and behavioral research*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Vuillet, M. (2012). «Elaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales », Thèse de doctorat, Université Paris Est, Ecole doctorale Ville, transport et territoires, 391 p.

Vuillet, M., Peyras, L., Serre, D., Diab, Y. (2012). "Decision making method for assessing performance of large levee alignment" *Journal of Decision Systems*, volume 21, n°2, pp. 137-160.

Vuillet M., Peyras L., Carvajal C., Serre D., Diab Y. (2013). "Levees performance evaluation based on subjective probability" *European Journal of Environment and Civil Engineering*, Volume 17, issue 5/2013, pp 329-349.

Woloshin, S., Schwartz, L.M., Byram, S., Fischhoff, B et Welch, H.G. (2000). A new scale for assessing perception of chance: A validation study. Medical Decision Making, 20, 298-307.

Wood, L. et Ford, J.M. (1993). « *Structuring Interviews with Experts During Knowledge Elicitation* », Ford et Bradshaw (dir.), *Knowledge Acquisition as Modeling*, New York, John Wiley and Sons Inc.

Wright, G., Rowe, G., Bolger, F., et Gammack, J. (1994). « Coherence, calibration, and expertise in judgment probability forcasting ». organizational behavior and human Decision processes, 57(1), 1-25.

Yachanin, S. A.,Tweney, R. D. (1982). The effect of the thematic content on cognitive staetegies in the four-card selection task. Bulletin of the Psychometric Society, 19, 87-90.

Zio, E. (2009) Reliability engineering : Old problems and new challenges. Reliability Engineering & System Safety, 94(2) :125–141, February.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1. Modèle classique de présentation des résultats finaux d'une étude de dangers d'une digue 21
Tableau 3-1. Grille d'analyse des dires experts (Peyras et *al.*, 2010) 37
Tableau 3-2. Transcription de descriptions expertes de l'incertain (CEA, 200) 38
Tableau 5-1. Caractéristiques des variables de calibration et des variables d'intérêt 49
Tableau 5-2. Méthode de calcul du vecteur de probabilité théorique $\boldsymbol{pi}$ 62
Tableau 5-3. Méthode de calcul du vecteur de probabilité subjective $\boldsymbol{si}$ 62
Tableau 5-4. Les deux cas à distinguer selon le modèle de Shlyakhter *et al*. (1994) 73
Tableau 5-5. Tableau de recensement des travaux sur le traitement des biais entachant le jugement expert 79
Tableau 6-1. Caractéristiques des variables de calibration et des variables d'intérêt pour les digues fluviales 86
Tableau 6-2. Tableau de recueil de jugement expert sur le facteur de sécurité (FS) 89
Tableau 6-3. Tableau explicatif d'une fiche du formulaire de questionnement concernant les variables de calibration déterministe - Facteur de Sécurité vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement 90
Tableau 6-4. Exemple d'une fiche d'un profil d'une digue issue du formulaire de questionnement développé dans ce travail de recherche – variable de calibration déterministe 90
Tableau 6-5. Tableau de recueil de jugement expert sur la probabilité de défaillance $\boldsymbol{Pfc}$ 93
Tableau 6-6. Tableau explicatif d'une fiche du formulaire de questionnement concernant les variables de calibration probabiliste – Probabilité de défaillance vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement 94
Tableau 6-7. Exemple d'une fiche d'un profil d'une digue issue du formulaire de questionnement développé dans ce travail de recherche – variable de calibration probabiliste 95
Tableau 6-8. Tableau explicatif d'une fiche du formulaire de questionnement concernant les variables d'intérêt probabiliste – Probabilité de défaillance vis-à-vis du mécanisme de rupture par érosion interne, affouillement et surverse 96
Tableau 6-9. Exemple d'une fiche d'un profil d'une digue issue du formulaire de questionnement développé dans ce travail de recherche – variable d'intérêt probabiliste (fiche concerne la digue du Drac rive gauche) 97
Tableau 6-10. Elicitations du panel d'experts données sur les variables de calibration déterministes et probabilistes 98
Tableau 6-11. Les vraies valeurs (valeurs connues) des variables de calibration calculées par une analyse analytique 99
Tableau 6-12. Détermination *du quantile* (q0) et du quantile (q100%) 102
Tableau 6-13. Calcul du poids de calibration par le calcul de vecteur de probabilité théorique **pi**, vecteur de probabilité subjective **si** et la composante d'entropie **Ke**, vecteur de calibration **ci** et la composante de calibration **Ce** 102

Tableau 6-14. Distribution agrégée à partir des valeurs calibrées de la variable de calibration (1) 105
Tableau 6-15. Distribution agrégée à partir des valeurs calibrées de la variable de calibration (2) 105
Tableau 6-16. Distribution agrégée à partir des valeurs calibrées de la variable de calibration (3) 105
Tableau 6-17. Distribution agrégée à partir des valeurs calibrées de la variable de calibration (4) 106
Tableau 6-18. Facteurs de correction déterminés par rapport aux distributions calibrées et agrégées des trois experts données sur les quatre variables de calibration 112
Tableau 6-19. Détail de la combinaison « EiCAD » et ses différentes modalités d'application au domaine des digues 117
Tableau 6-20. Détail de la combinaison « EiDA » et ses différentes modalités d'application au domaine des digues 121
Tableau 7-1. Caractéristiques géotechniques de la composition du corps et de la fondation de la digue du Drac rive gauche pour le secteur « RG1 » 132
Tableau 7-2. Caractéristiques géotechniques de la composition du corps et de la fondation de la digue du Drac rive gauche pour le secteur « RG2 » 133
Tableau 7-3. Données hydrauliques présentant le résultat d'une simulation des crues pour deux gammes de crues associées à des périodes de retour 200 ans et 500 ans pour les profils de la digue du Drac rive gauche 133
Tableau 8-1. Les variables de calibration déterministes (Fs) 137
Tableau 8-2. Les variables de calibration probabiliste ($\boldsymbol{Pfc}$) 138
Tableau 8-3. Les variables d'intérêt probabiliste ($\boldsymbol{Pfc}$) 140
Tableau 8-4. Tableau récapitulatif d'analyse de la justesse des élicitations expertes du panel pour la phase d'élicitation des avis experts 144
Tableau 8-5. Résultats de la phase de calibration selon la 1ère modalité d'application d'« EiCAD » 147
Tableau 8-6. Résultats de la phase de calibration selon la 2ème modalité d'application d'« EiCAD » 148
Tableau 8-7. Résultats de la phase de calibration selon la 3ème modalité d'application d'« EiCAD » 149
Tableau 8-8. Comparaison des résultats finaux issus de la mise en œuvre de l'approche « EiCAD » selon des trois modalités d'application et par rapport à la répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude dé-biaisé 170
Tableau 9-1. Coefficients de correction obtenus selon la 1ère modalité d'application d'EiDA 173
Tableau 9-2. Qualité de dé-biaisage des avis experts du panel dé-biaisés selon la 1ère modalité d'application d'EiDA 177
Tableau 9-3. Coefficients de corrections obtenus selon la 2ème modalité d'application d'EiDA 178
Tableau 9-4. Qualité de dé-biaisage des avis experts du panel dé-biaisés selon la 2ème modalité d'application d'EiDA 181

Tableau 9-5. Coefficients de corrections obtenus selon la 3ème modalité d'application d'EiDA 182
Tableau 9-6. Qualité de dé-biaisage des avis experts du panel dé-biaisés selon la 3ème modalité d'application d'EiDA 185
Tableau 9-7. Comparaison des résultats issus de la mise en œuvre de l'approche « EiDA » selon des trois modalités d'application et par rapport à la répartition des vraies valeurs de variable de calibration sur l'ensemble de l'intervalle d'incertitude dé-biaisé..... 197
Tableau 10-1. Comparaison de score de calibration, de score d'entropie et poids de calibration issus de la 1ère modalité d'application des approches « EiCAD » et « EiDA » ... 199
Tableau 10-2. Comparaison de score de calibration, de score d'entropie et poids de calibration issus de la 2ème modalité d'application des approches « EiCAD » et « EiDA » .. 200
Tableau 10-3. Comparaison de score de calibration, de score d'entropie et poids de calibration issus de la 3ème modalité d'application des approches « EiCAD » et « EiDA » .. 200
Tableau 10-4. Tableau de comparaison de résultats issus de l'application d'EiCAD et d'EiDA sur la variable d'intérêt « mécanisme de rupture par érosion interne »..... 206
Tableau 10-5. Comparaison inter-comparée des approches développées 207

LISTES DES FIGURES

Figure 1-1. Les différents composants d'une digue (Traduit et adapté de NFIP, 2000) 6
Figure 1-2. Section transversal illustrant l'interaction entre les digues et la ville (Traduit et adapté de Arcadis/FXFOWLE- CITY ATLAS, http://newyork.thecityatlas.org/lifestyle/manhattan-2014-back-and-getting-bigger-than-ever-2/) 7
Figure 1-3. Exemple de Digue en remblai homogène sur le Rhône (Mériaux *et al.,* 2001). 8
Figure 1-4. Exemple de digue en remblai zoné (Mériaux et *al.,* 2001)..... 8
Figure 1-5. Exemple de digue mixte : mur poids et remblai (Mériaux et *al.*, 2001)..... 9
Figure 1-6. Les défaillances hydrauliques et structurelles: deux situation indépendantes ou non causer la défaillance d'un système d'endiguement (Tourment et *al.,* 2013b; Ciria et *al.,* 2013; Tourment et *al.,* 2014)..... 10
Figure 1-7. Illustration de la hauteur de la charge hydraulique et la longueur du trajet de l'écoulement (Mériaux et *al.,* 2001) 11
Figure 1-8. Principe de la surverse (Traduit est adapté de l'ILH, 2013)..... 12
Figure 1-9. Erosion côté terre (Traduit est adapté de l'ILH, 2013)..... 13
Figure 1-10. Érosion externe du corps ou de la fondation d'une digue en terre côté eau (Traduit est adapté de l'ILH, 2013)..... 13
Figure 1-11. Glissements superficiels affectant un corps de digue en terre (Traduit est adapté de l'ILH, 2013) 14
Figure 1-12. Construction d'indicateurs de performance (IP) pour les digues (Serre, 2005) 18
Figure 1-13. Evaluation du phénomène « trous d'animaux fouisseurs dans la recherche amont étanche » (Serre, 2005)..... 19
Figure 1-14. Grille d'analyse pour estimer la probabilité d'occurrence des défaillances... 21
Figure 1-15. Indicateur de performance pour le mécanisme de rupture par érosion interne (Vuillet *et al.,* 2012) 25
Figure 1-16. Echelle d'évaluation de la performance des digues (Vuillet *et al.,* 2012) 25
Figure 1-17. Propagation des incertitudes des critères par simulations de Monte-Carlo pour l'indicateur de performance érosion interne (Vuillet, 2012)..... 26
Figure 4-1. Les différents besoins du domaine du génie civil pour une meilleure exploitation du jugement expert..... 44
Figure 4-2. Démarche générale de la thèse..... 44
Figure 5-1. Organigramme de la procédure générale d'utilisation des variables de calibration et des variables d'intérêt..... 49
Figure 5-2. Représentation des variables dé-biaisées par les coefficients de correction par rapport aux variables biaisées 77
Figure 6-1. Les différents objectifs liés au domaine du génie civil pour l'élaboration d'une démarche complète pour l'évaluation de la fiabilité structurelle des digues à partir du jugement d'expert..... 83

Figure 6-2. Organigramme de la démarche mathématique développée pour l'adaptation du modèle de Clemen et Lichtendahl (2002) au domaine des digues 111
Figure 6-3. Coefficients de correction issus de l'application de la phase de dé-biaisage au domaine des digues 115
Figure 6-4. Organigramme d'application de l'approche "EiCAD" et choix d'une modalité convenable aux digues 120
Figure 6-5. Organigramme d'application de l'approche "EiDA" et choix d'une modalité convenable aux digues 123
Figure 7-1. Plan général de la digue du Drac rive gauche. 127
Figure 7-2. Tronçon 1, Profil P91 - Vue vers l'aval 130
Figure 7-3. Tronçon 1, Profil P93 - Vue vers l'aval 130
Figure 7-4. Tronçon 1, Profil : P97/98 - Vue vers l'aval : limite de propriété côté plaine 130
Figure 7-5. Tronçon 1, Profil : P107 - Vue vers l'aval : voie d'accès de la rue Sisteron et aire de repos 130
Figure 7-6. Tronçon 2, Profil : P119 - Vue vers l'aval : voirie lourde en crête et talus côté plaine remblayé (après la rue de Chamrousse) 131
Figure 7-7. Tronçon 2, Profil : P123 - Vue vers l'aval : mur béton rue de la Liberté 131
Figure 7-8. Tronçon 2, Profil : P124 - Vue vers l'aval : talus côté rivière mur béton 131
Figure 7-9. Tronçon 3, Profil : P133 - Vue vers l'aval : voie d'accès et côté plaine remblayé (rue Jean Pain) 131
Figure 7-10. Tronçon 3, Profil : P128 - Vue vers l'aval 131
Figure 7-11. Tronçon 3, Profil : P136/P137 - Vue vers l'aval : voie d'accès rue Aubert. 131
Figure 7-12. Tronçon 3, Profil : P138 - Vue vers l'aval 132
Figure 7-13. Tronçon 3, Profil : P39/P140 - Vue vers l'aval : voie d'accès rue des Rachais 132
Figure 8-1. Objectifs des phases d'application de l'approche « EiCAD » au domaine des digues fluviales 135
Figure 8-2. Elicitations de l'expert (1), de gauche à droit : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et à l'érosion interne. 142
Figure 8-3. Distributions agrégées des avis experts calibrés selon la 1ère modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs) et ($\boldsymbol{Pfc}$) 153
Figure 8-4. Distributions agrégées des avis experts calibrés selon la 2ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs) 155
Figure 8-5. Distributions agrégées des avis experts calibrés selon la 3ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration ($\boldsymbol{Pfc}$) 157
Figure 8-6. Distributions dé-biaisées des avis experts agrégés et calibrés selon la 1ère modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs) et ($\boldsymbol{Pfc}$) 161
Figure 8-7. Qualité de dé-biaisage présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution calibrée et agrégée selon la 1ère modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs) et ($\mathbf{Pfc}$) 162
Figure 8-8. Distributions dé-biaisées des avis experts agrégés et calibrés selon la 2ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs) 164

Figure 8-9. Qualité de dé-biaisage présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution calibrée et agrégée selon la 2ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (Fs) 165
Figure 8-10. Distributions dé-biaisées des avis experts agrégés et calibrés selon la 3ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (***Pfc***) 167
Figure 8-11. Qualité de dé-biaisage présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution calibrée et agrégée selon la 3ème modalité d'application d'« EiCAD » pour les variables de calibration (**Pfc**) .. 168
Figure 9-1. Objectifs des phases d'application de l'approche « EiDA » au domaine des digues fluviales 172
Figure 9-2. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (1) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (***Pfc***) 175
Figure 9-3. Qualité de dé-biaisage des avis bruts de l'expert (1) présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution non dé-biaisée, selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (**Pfc**) 177
Figure 9-4. Distributions dé-biaisées, des avis bruts de l'expert (1) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) 179
Figure 9-5. Qualité de dé-biaisage des avis bruts de l'expert (1) présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution non-dé-biaisée, selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » par les variables de calibration (Fs) 181
Figure 9-6. Distributions dé-biaisées, des avis bruts de l'expert (1), selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (***Pfc***) 183
Figure 9-7. Qualité de dé-biaisage des avis bruts de l'expert (1) présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée vs la distribution non dé-biaisée, selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » par les variables de calibration (**Pfc**) 185
Figure 9-8. Distributions agrégées des avis experts dé-biaisés selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et ***Pfc*** 188
Figure 9-9. Qualité de dé-biaisage et d'agrégation présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée et agrégée vs la distribution idéale selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (**Pfc**) 190
Figure 9-10. Distributions agrégées des avis experts dé-biaisés selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » dont les variables de calibration sont les variables de calibration déterministes (Fs) 191
Figure 9-11. Qualité de dé-biaisage et d'agrégation présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée et agrégée vs la distribution idéale selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) 193
Figure 9-12. Distributions agrégées des avis experts dé-biaisés selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » dont les variables de calibration sont les variables de probabilistes ***Pfc*** 194

Figure 9-13. Qualité de dé-biaisage et d'agrégation présentée par comparaison entre la probabilité des intervalles interquantiles de la distribution dé-biaisée et agrégée vs la distribution idéale selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les (**Pfc**) 196

Figure B-1. Elicitations de l'expert (1) (de gauche à droit) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Figure B-2.Elicitations de l'expert (2) (de gauche à droit) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Figure B-3. Elicitations de l'expert (3) (de gauche à droit) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Figure B-4. Elicitations de l'expert (4) (de gauche à droit) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Figure B-5. Elicitations de l'expert (5) (de gauche à droit) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Figure B-6. Elicitations de l'expert (6) (de gauche à droit) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Figure C-7. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (1) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (***Pfc***)

Figure C-8. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (2) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (***Pfc***)

Figure C-9. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert(3) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (**Pfc**)

Figure C-10. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert(4) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (***Pfc***)

Figure C-11. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert(5) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (***Pfc***)

Figure C-12. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert(6) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (***Pfc***)

Figure C-13. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (1) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Figure C-14. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (2) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Figure C-15. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (3) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Figure C-16. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (4) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Figure C-17. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (5) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Figure C-18. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (6) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Figure C-19. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (1) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (***Pfc***)

Figure C-20. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (2) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (***Pfc***)

Figure C-21. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (3) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (***Pfc***)

Figure C-22. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (4) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (***Pfc***)

Figure C-23. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (5) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (***Pfc***)

Figure C-24. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (6) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (***Pfc***)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Extrait du formulaire de questionnement

Annexe B : Résultat de la phase d'« Ei » (élicitation individuelle) du panel d'experts

Annexe C : Résultat de la phase de Dé-biaisage des avis bruts du panel d'experts – Approche « EiDA »

ANNEXES

Annexe A

Extrait du formulaire de questionnement

Date	
N° de document	

Formulaire
« Retour d'expérience - expert individuel »

Evaluation probabiliste, par jugement expert, de la fiabilité de la digue de classe A du Drac - Rive gauche

Formulaire préparé par
Michel HATHOUT
Doctorant en Génie Urbain - Université Paris-Est
Irstea – Unité de Recherche Risques, ECOsystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience
Centre d'Aix-en-Provence, 3275 route de Cézanne – CS 40061
F-13182 Aix-en-Provence Cedex 5
E-mail: michel.hathout@irstea.fr

B. Formulaire d'évaluation, par le jugement expert, du Facteur de Sécurité (FS) des digues vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement

Notice de remplissage des fiches de la section B de ce formulaire

Il est demandé à l'expert de déterminer respectivement, par son jugement expert, trois valeurs du facteur de sécurité des digues vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement (FS : quantile 5%, FS : quantile 95%, FS : quantile 50%) et de remplir ses jugements dans les zones colorées, de chaque fiche des profils (tableau ci-contre).

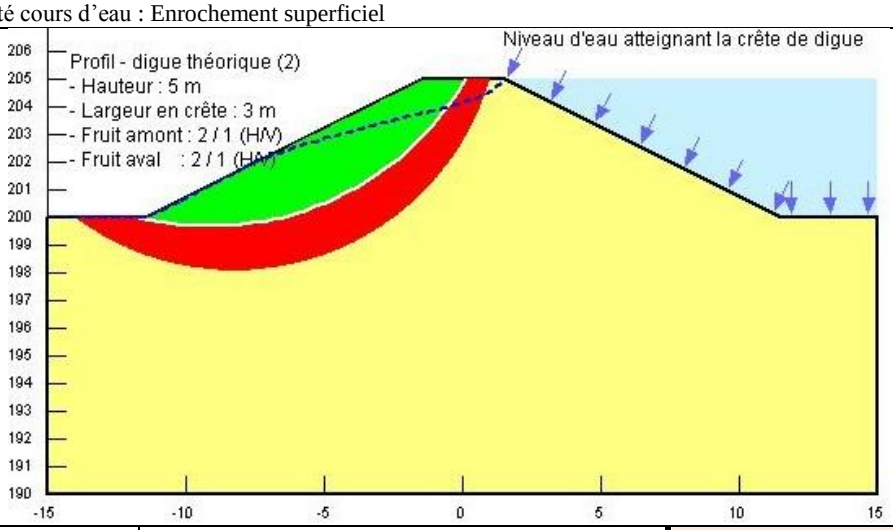
Facteur de sécurité (FS)	FS : quantile 5%	
	FS : quantile 95%	
	FS : Valeur la plus vraisemblable (q50%)	

Par ailleurs, les trois valeurs de facteurs de sécurité (FS) des talus, déterminés par l'expert, doivent correspondre aux considérations suivantes :

4) **Pour le champ « FS : quantile 5% » :** je suis certain à 95% que le facteur de sécurité du talus du profil analysé de la digue est au moins : (FS : quantile 5%)
5) **Pour le champ « FS : quantile 95% » :** je suis certain à 95% que le facteur de sécurité du talus du profil analysé de la digue ne dépasse pas : (FS : quantile 95%)
6) **Pour le champ « FS : quantile 50% » :** je pense que la valeur la plus vraisemblable du facteur de sécurité du talus du profil analysé de la digue correspond à : (FS : quantile 50%)

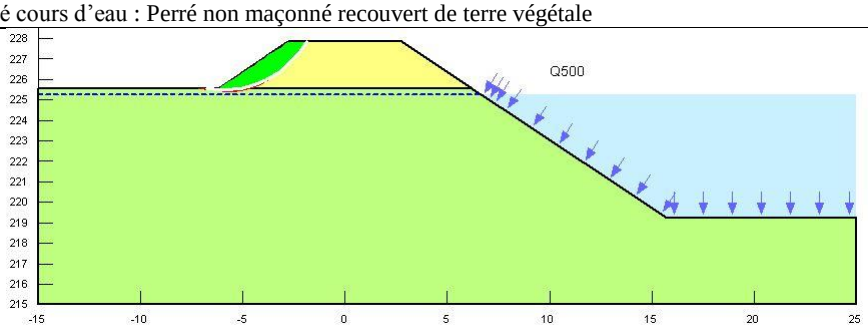
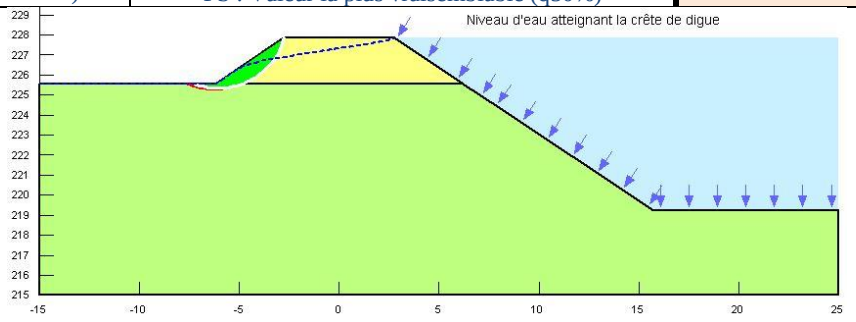
N.B. les estimations des quantiles 5% et 95% correspondent à une fourchette de valeurs dans laquelle se situe l'estimation de la valeur du quantile 50% qui correspond à la valeur la plus vraisemblable à laquelle l'expert accorde confiance.
L'estimation des quantiles 5% et 95% permet à l'expert de refléter ses incertitudes liées à son jugement propre de la valeur la plus vraisemblable (quantile 50%).

Cette section B comporte 30 fiches correspondant à des profils de digue (théorique et digue de Drac) pour lesquels les Facteurs de Sécurité (FS), des talus, sont demandés à être évalués par l'expert.

<table>
<tr><td>Fiche 02</td><td colspan="3">Profil - Digue Théorique 2</td></tr>
<tr><td colspan="4">Compte tenu de toutes les informations théoriques à disposition, quel est le facteur de sécurité de la digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement du talus aval qu'on pourrait accorder à ce profil de digue, en cas d'occurrence d'une crue atteignant la crête de digue ?</td></tr>
<tr><td>Données Géométriques</td><td colspan="3">- Hauteur = 5 m
- Côte en crête = 205 m NGF
- Largeur en crête = 3 m
- Fruit amont = 2/1 (H/V)
- Fruit aval = 2/1 (H/V)</td></tr>
<tr><td>Données Hydrauliques</td><td colspan="3">- Niveau d'eau atteignant la crête de digue 205 m NGF
- Ligne piézométrique calculée en régime permanent</td></tr>
<tr><td>Données Géotechniques</td><td colspan="3">Matériaux constitutifs du remblai du corps et de la fondation de la digue
- Matériaux sable-limoneux
- Perméabilité du corps et de la fondation $K = 10^{-6}\ m/s$
- Poids volumique : $\gamma_h = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
- Angle de frottement : $\emptyset = 25°$
- Cohésion : $c = 5\ kPa$</td></tr>
<tr><td>Revêtements protection</td><td colspan="3">- Côté plaine : Terre végétale
- Côté cours d'eau : Enrochement superficiel</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Valeurs du facteur de sécurité FS à estimer*</td><td colspan="3"> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Facteur de sécurité (FS)</td><td>FS : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

*La figure présente :

- Le niveau d'eau dans la rivière.
- La ligne piézométrique dans la digue (ligne bleu pointillée)
- La zone concernée par le glissement (cercle et « zone rouge » où le FS est minimal)

<table>
<tr><td>Fiche 25</td><td colspan="3">Tronçon 1 : Profil – P 90</td></tr>
<tr><td colspan="4">Compte tenu de toutes les informations théoriques à disposition, quel est le facteur de sécurité de la digue vis-à-vis du mécanisme de rupture par glissement du talus aval qu'on pourrait accorder à ce profil de digue, en cas d'occurrence d'une crue de période de retour 500 ans et, en cas d'occurrence d'une crue atteignant la crête de digue ?</td></tr>
<tr><td>Historique de la digue</td><td colspan="3">- La digue est implantée en rive gauche du lit mineur du Drac, d'un linéaire total est d'environ 5500 mètres.
- Elle a été mise en œuvre à partir du 18ème siècle dans l'objectif de protéger la ville de Grenoble contre les crus du Drac : 38,000 personnes résidentes et saisonnières ainsi que 477 établissements recevant du public.
- L'ADIDR est le gestionnaire et le responsable de cette digue.</td></tr>
<tr><td>Données Géométriques</td><td colspan="3">- Hauteur = 2,28 m
- Côte en crête = 227,85 m NGF
- Largeur en crête = 5,57 m
- Fruit amont = 3/2 (H/V)
- Fruit aval = 3/2 (H/V)</td></tr>
<tr><td>Données Hydrauliques</td><td colspan="3">- Niveau amont Q500 = 225,26 m NGF (revanche = 2,59 m)
- Niveau amont Q200 = 224,64 m NGF (revanche = 3,21 m)
- Ligne piézométrique calculée en régime permanent</td></tr>
<tr><td>Données Géotechniques</td><td colspan="3">Matériaux constitutifs du remblai du corps et de la fondation de la digue
- Corps : sablo-graveleux, semblent localement peu compact. Perméabilité $K = 10^{-3}\ m/s$
- Fondation : sablo-graveleux, semblent présenter des lentilles de matériaux plus ou moins compacts. Perméabilité $K = 10^{-5}\ m/s$
- Poids volumique : $\gamma_h = 21\ kN/m^3$
- Cohésion : $c = 0\ kPa$
- Angle de frottement : $\emptyset = 35°$</td></tr>
<tr><td>Revêtements de protection</td><td colspan="3">- Côté plaine : Terre végétale
- Côté cours d'eau : Perré non maçonné recouvert de terre végétale</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Valeurs du facteur de sécurité FS à estimer*</td><td colspan="3"> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Facteur de sécurité (FS) (Talus aval)</td><td>FS : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3"> 
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Facteur de sécurité (FS) (Talus aval)</td><td>FS : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>FS : Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

*La figure présente :

- Le niveau d'eau dans la rivière.
- La ligne piézométrique dans la digue (ligne bleu pointillée)
- La zone concernée par le glissement (cercle et « zone rouge » où le FS est minimal)

C. Formulaire d'évaluation, par le jugement expert, de la Probabilité de Défaillance (P_{fc}) de l'ouvrage

Notice de remplissage des fiches de la section C de ce formulaire

Il est demandé à l'expert de déterminer respectivement, par le jugement expert, trois valeurs de la Probabilité de Défaillance (P_{fc}) de l'ouvrage vis-à-vis tous les mécanismes de rupture (P_{fc} : quantile 5%, P_{fc} : quantile 95%, P_{fc} : quantile 50%) et de remplir ses jugements dans les zones colorées, de chaque fiche de profils (tableau ci-contre).

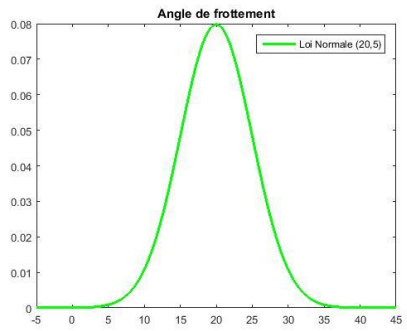
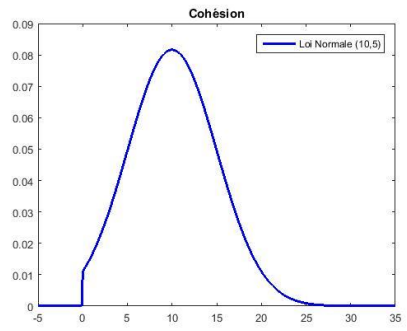
Probabilité de défaillance (P_{fc})	P_{fc} : quantile 5%	
	P_{fc} : quantile 95%	
	P_{fc} : Valeur la plus vraisemblable (q50%)	

Par ailleurs, les trois valeurs de la probabilité de défaillance de l'ensemble de l'ouvrage, déterminées par l'expert, doivent correspondre aux considérations suivantes :

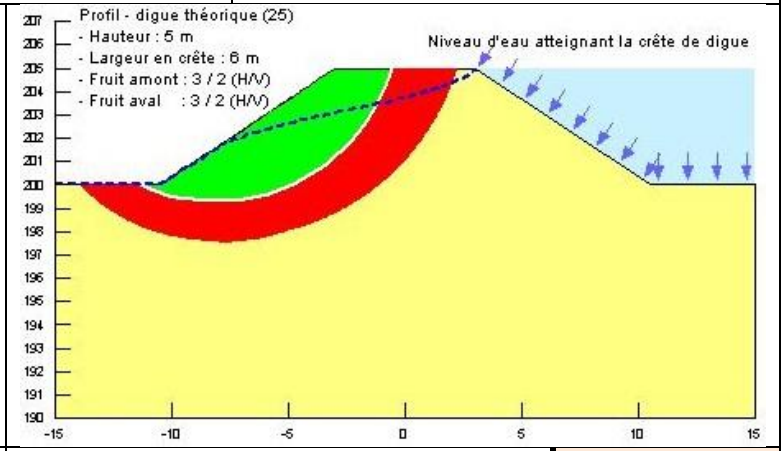
4) **Pour le champ « P_{fc} : quantile 5% » :** je suis certain à 95% que la probabilité de défaillance du profil analysé de la digue est au moins : (P_{fc} : quantile 5%)
5) **Pour le champ « P_{fc} : quantile 95% » :** je suis certain à 95% que la probabilité de défaillance du profil analysé de la digue ne dépasse pas : (P_{fc} : quantile 95%)
6) **Pour le champ « P_{fc} : quantile 50% » :** je pense que la valeur la plus vraisemblable de la probabilité de défaillance du profil analysé de la digue correspond à : (P_{fc} : quantile 50%)

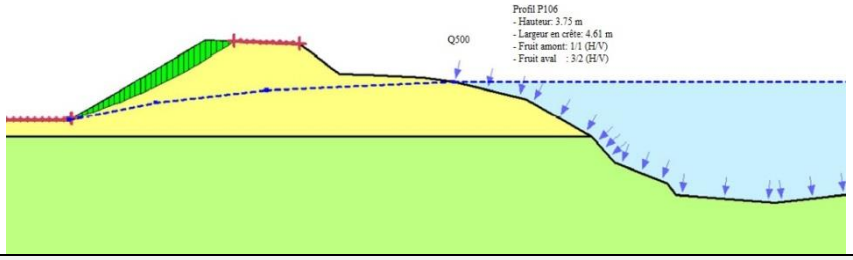
N.B. les estimations des quantiles 5% et 95% correspondent à une fourchette de valeurs dans laquelle se situe l'estimation de la valeur du quantile 50% qui correspond à la valeur la plus vraisemblable à laquelle l'expert accorde confiance.
L'estimation des quantiles 5% et 95% permet à l'expert de refléter ses incertitudes liées à son jugement propre de la valeur la plus vraisemblable (quantile 50%).

Cette section C comporte 30 fiches correspondant à des profils de digue (théorique et digue de Drac) pour lesquels la probabilité de défaillance (P_{fc}) vis-à-vis d'un mécanisme de rupture est demandée d'être évaluée par l'expert.

<table>
<tr><td>Fiche 30</td><td colspan="3">Profil – Digue Théorique 25</td></tr>
<tr><td colspan="4">Compte tenu de toutes les informations à disposition, quelle est la probabilité P_{fc} que la digue se rompe par glissement du talus aval en cas d'occurrence d'une crue ayant un niveau d'eau atteignant la crête de digue ?
$P_{f-Total} = P_{fc} * P_{crue}$</td></tr>
<tr><td>Données Géométriques
Cf. Figure ci-dessous</td><td colspan="3">- Hauteur = 5 m
- Côte en crête = 205 m NGF
- Largeur en crête = 6 m
- Fruit amont = 3/2 (H/V)
- Fruit aval = 3/2(H/V)</td></tr>
<tr><td>Données Hydrauliques</td><td colspan="3">- Niveau d'eau de la crue atteignant la crête de la digue
- Ligne piézométrique calculée en régime permanent</td></tr>
<tr><td>Données Géotechniques</td><td colspan="3">Corps et Fondation
- Matériaux sable-limoneux
- Perméabilité $K = 10^{-6}\ m/s$
- Poids volumique : $\gamma_h = 18\ kN/m^3$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Lois des probabilités des données d'entrée</td><td> 
</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td>L'angle de frottement
(corps - fondation)

Loi probabiliste : loi normale
Moyenne : 20°
Ecart-type : 5°</td><td colspan="2">La cohésion
(corps - fondation)

Loi probabiliste : loi normale tronquée à 0
Moyenne : 10 kPa
Ecart-type : 5 kPa
Min = 0 kPa</td></tr>
<tr><td>Analyse déterministe*</td><td>FS calculé
(avec les valeurs moyennes)
Talus aval
1,3</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td>Analyse probabiliste</td><td>Probabilité de défaillance (P_{fc}) au glissement</td><td>P_{fc} : quantile 5%
P_{fc} : quantile 95%
P_{fc}: Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>Fiche 59</td><td colspan="3">Tronçon 1 : Profil P 106</td></tr>
<tr><td colspan="4">Compte tenu de toutes les informations à disposition, quelle est la probabilité P_{fc} que la digue se rompe par érosion interne en cas d'occurrence d'une crue Q500 ($P_{crue} = 1/500$) ?
$P_{f-Total} = P_{fc} * P_{crue}$</td></tr>
<tr><td>Vue aérienne du tronçon</td><td colspan="3">
</td></tr>
<tr><td>Coupe type</td><td colspan="3"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="4">Critères d'évaluation présentant des données techniques recenssées sur l'ensemble du tronçon</td></tr>
<tr><td>$C_{1,EI}$
Perméabilité du corps de digue</td><td colspan="3">- Perméabilité du corps : $K = 10^{-3}\ m/s$
- Perméabilité de la fondation : $K = 10^{-6}$ à $10^{-5}\ m/s$
- Géométrie du profil : hauteur d'endiguement est de 3,24 m – largeur en crête 4,61 m – fruit aval 3H/2V – fruit amont 1H/1V - revanche est ~de 1,25 m pour une crue Q500
- Fuites : non détectées
- Etanchéité de la protection amont : Perré maçonné recouvert de terre végétale</td></tr>
<tr><td>$C_{2,EI}$
Résistance du corps de digue à l'érosion interne</td><td colspan="3">- Matériaux constitutifs du remblai corps de la digue : sablo-graveleux, semblent localement peu compact.
- Matériaux constitutifs de la fondation de la digue : sablo-graveleux, semblent présenter des lentilles de matériaux plus ou moins compacts.
- Cohésion $c = 0\ kPa$
- Angle de frottement Ø=35°
- Discontinuités du remblai : non identifiées par l'observation d'un géotechnicien in situ
- Le gradient hydraulique critique des matériaux est de $i_{cr} = 0{,}1$
- Le gradient hydraulique global de ce profil (P 106) est de $i_{glob} = 0{,}09$ (régime permanent)
- La durée des crues 2 jours</td></tr>
<tr><td>$C_{3,EI}$
Singularités dans le corps de la digue</td><td colspan="3">- Arbres et racines : présence importante d'arbres sur tout le linéaire de la digue côté talus rivière.
- Terriers : pas de terriers importants détectés.
- Ouvrages traversant : pas d'ouvrages traversant identifiés</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Analyse probabiliste</td><td rowspan="3">Probabilité de défaillance (P_{fc}) à l'Erosion Interne</td><td>P_{fc} : quantile 5%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc} : quantile 95%</td><td></td></tr>
<tr><td>P_{fc} : Valeur la plus vraisemblable (q50%)</td><td></td></tr>
</table>

Annexe B

Résultat de la phase d'« Ei » (élicitation individuelle) du panel d'experts

Les résultats des élicitations individuelles de l'expert (1)

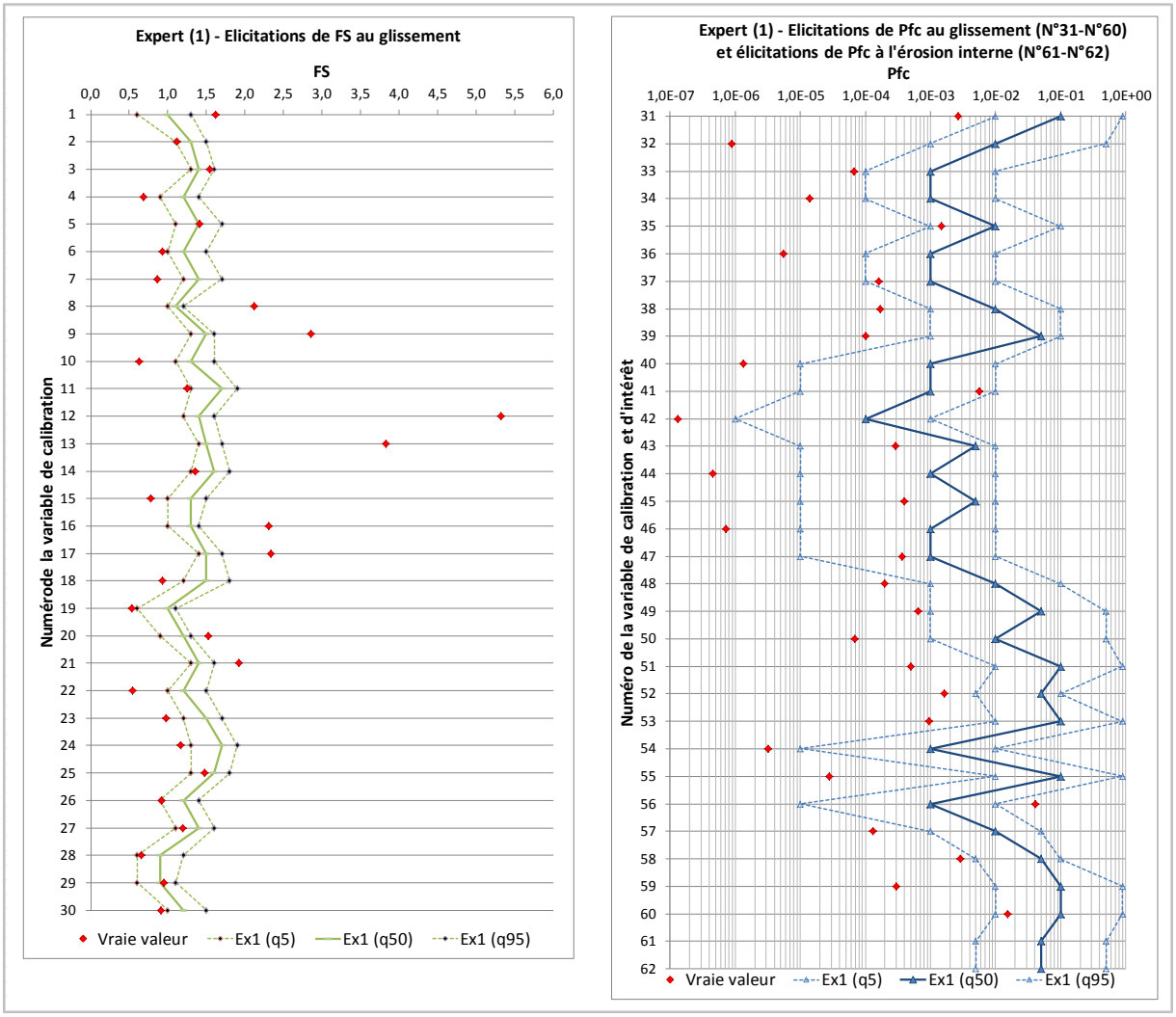


Figure B-1. Elicitations de l'expert (1) (de gauche à droit) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Les résultats des élicitations individuelles de l'expert (2)

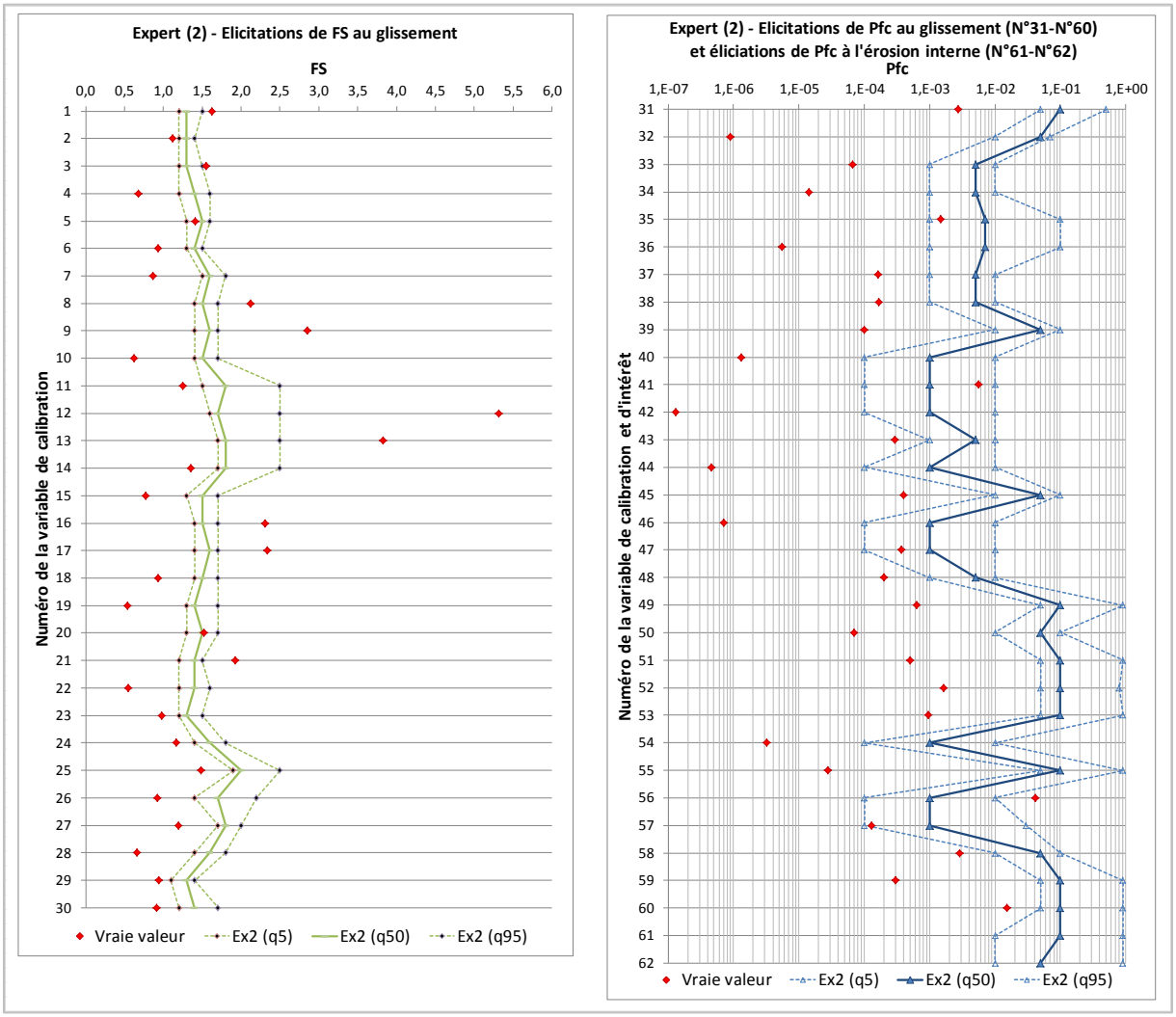


Figure B-2.Elicitations de l'expert (2) (de gauche à droit) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Les résultats des élicitations individuelles de l'expert (3)

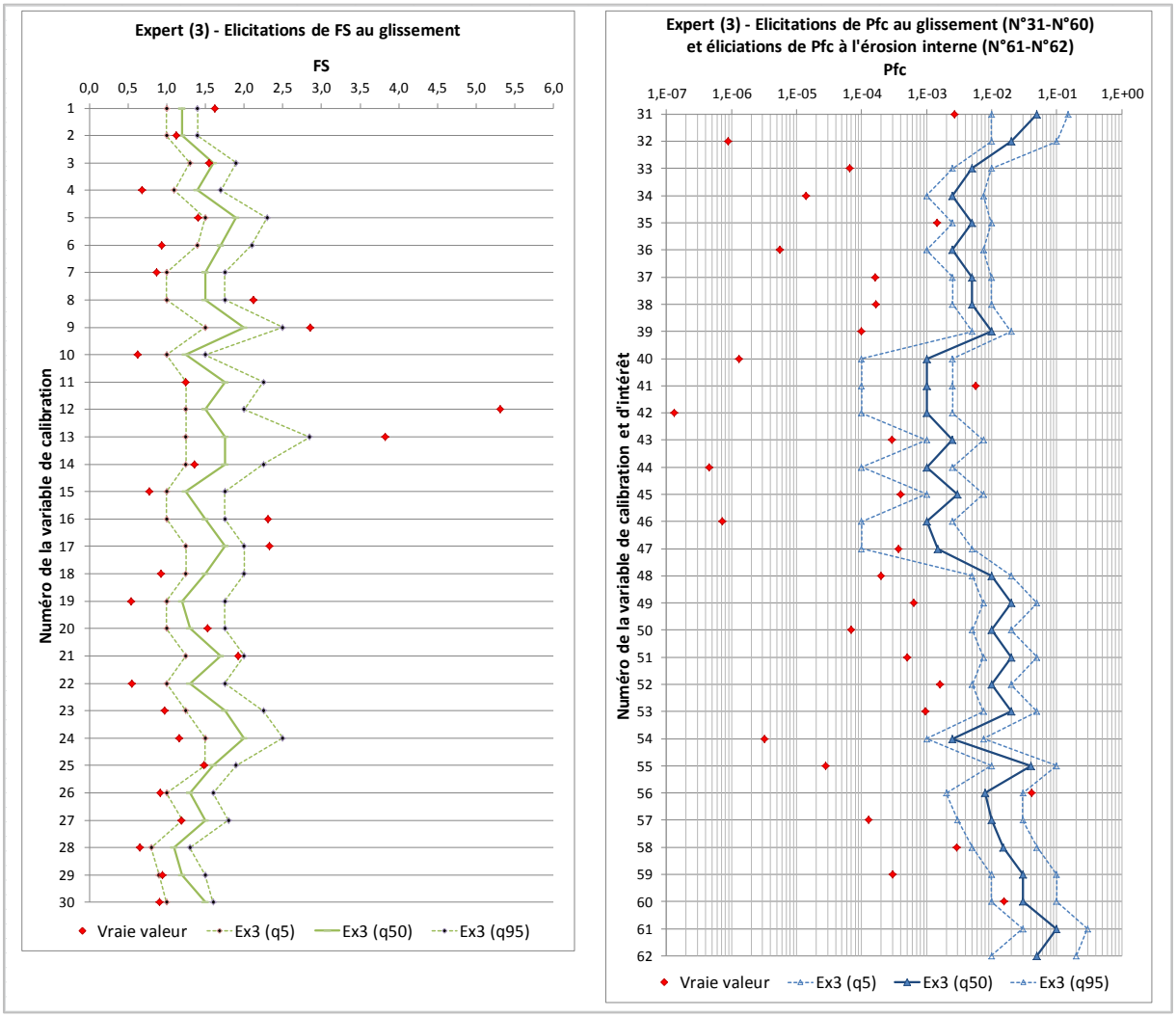


Figure B-3. Elicitations de l'expert (3) (de gauche à droite) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Les résultats des élicitations individuelles de l'expert (4)

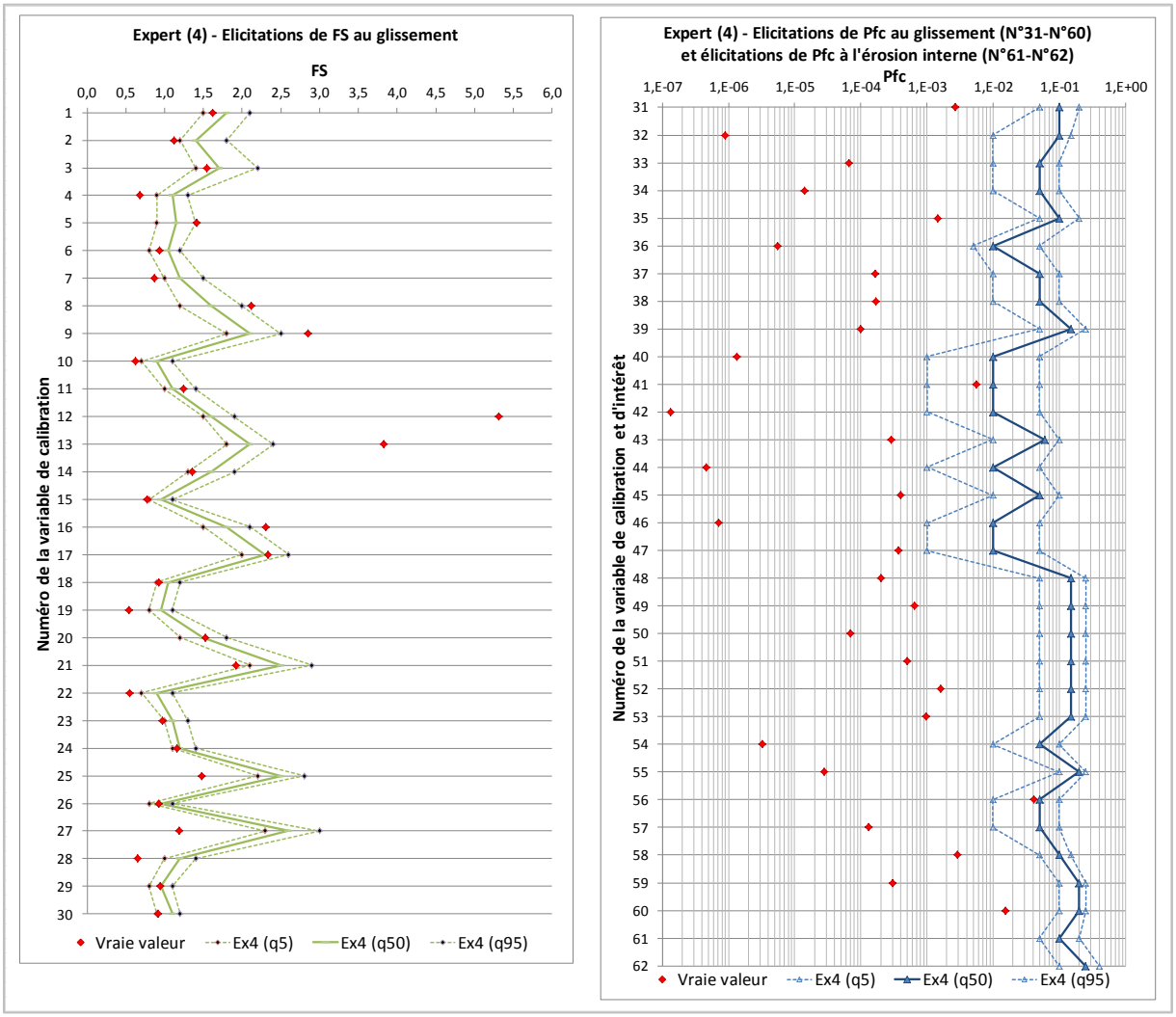


Figure B-4. Elicitations de l'expert (4) (de gauche à droite) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Les résultats des élicitations individuelles de l'expert (5)

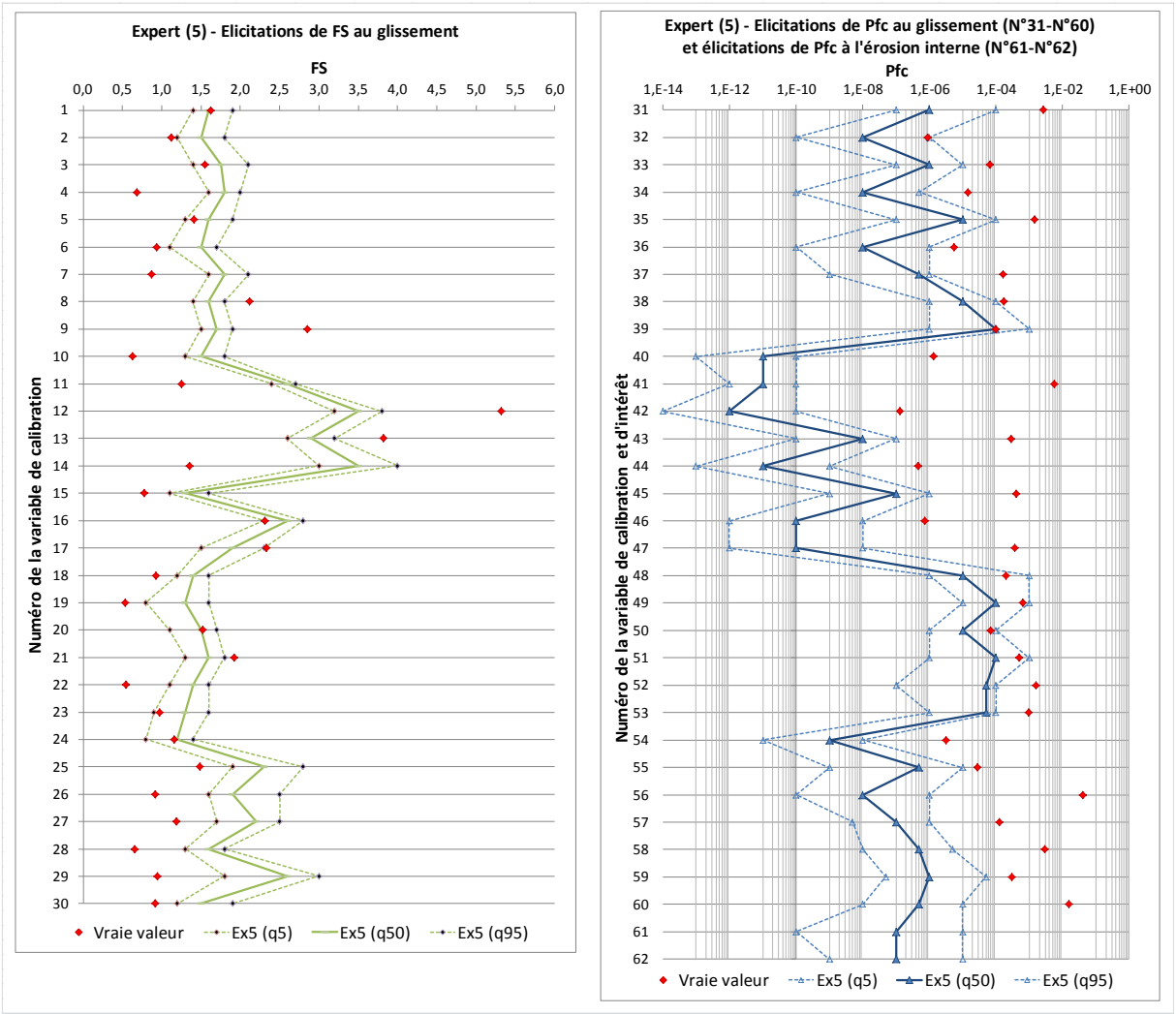


Figure B-5. Elicitations de l'expert (5) (de gauche à droite) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Les résultats des élicitations individuelles de l'expert (6)

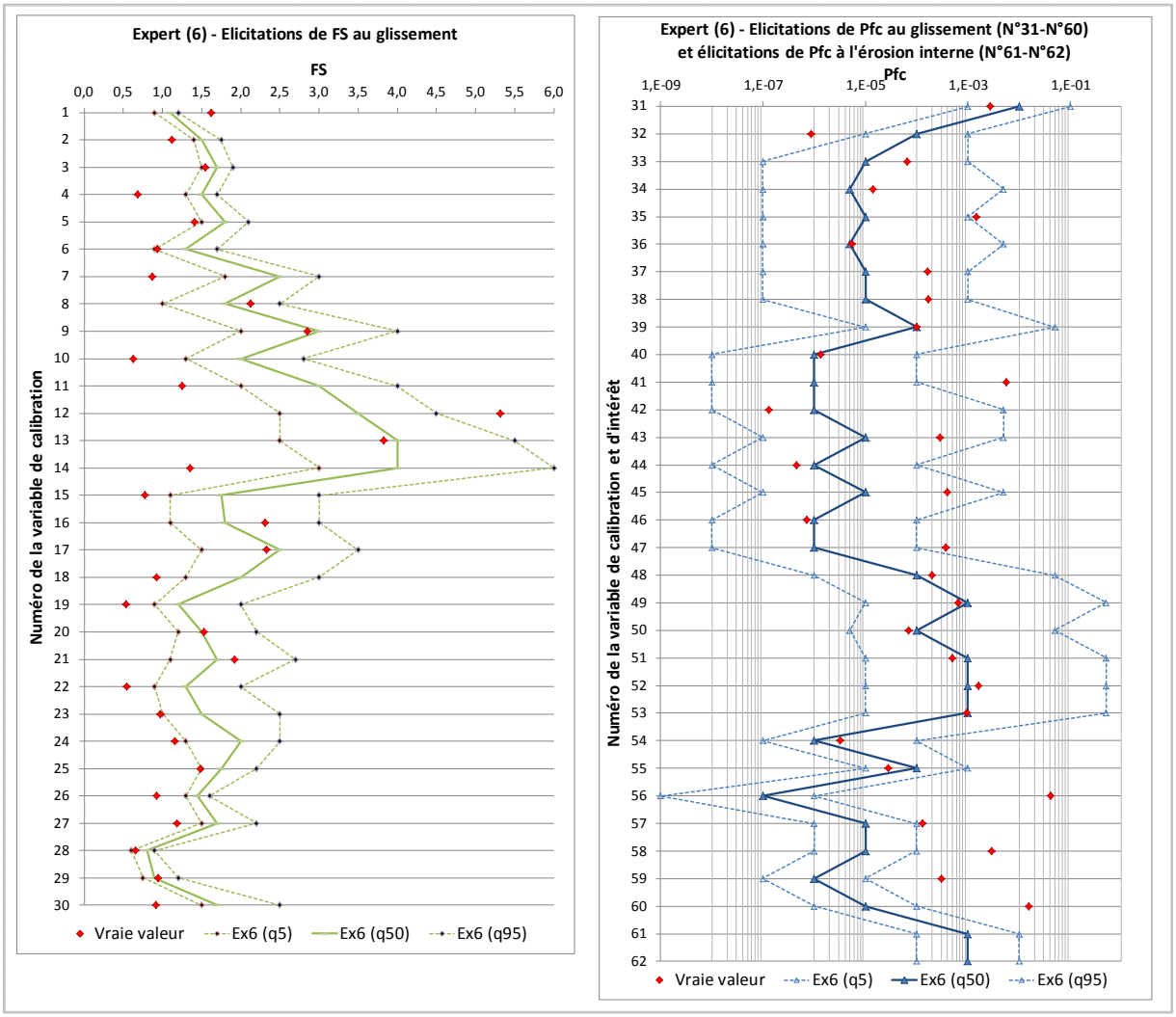


Figure B-6. Elicitations de l'expert (6) (de gauche à droite) : les facteurs de sécurité au glissement, les probabilités de défaillance au glissement et les probabilités de défaillance à l'érosion interne

Annexe C

Résultat de la phase de Dé-biaisage des avis bruts du panel d'experts – Approche « EiDA »

Résultat de la phase de Dé-biaisage des avis bruts du panel d'experts – Approche « EiDA » - 1ère modalité

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (1) selon la 1ère modalité d'application

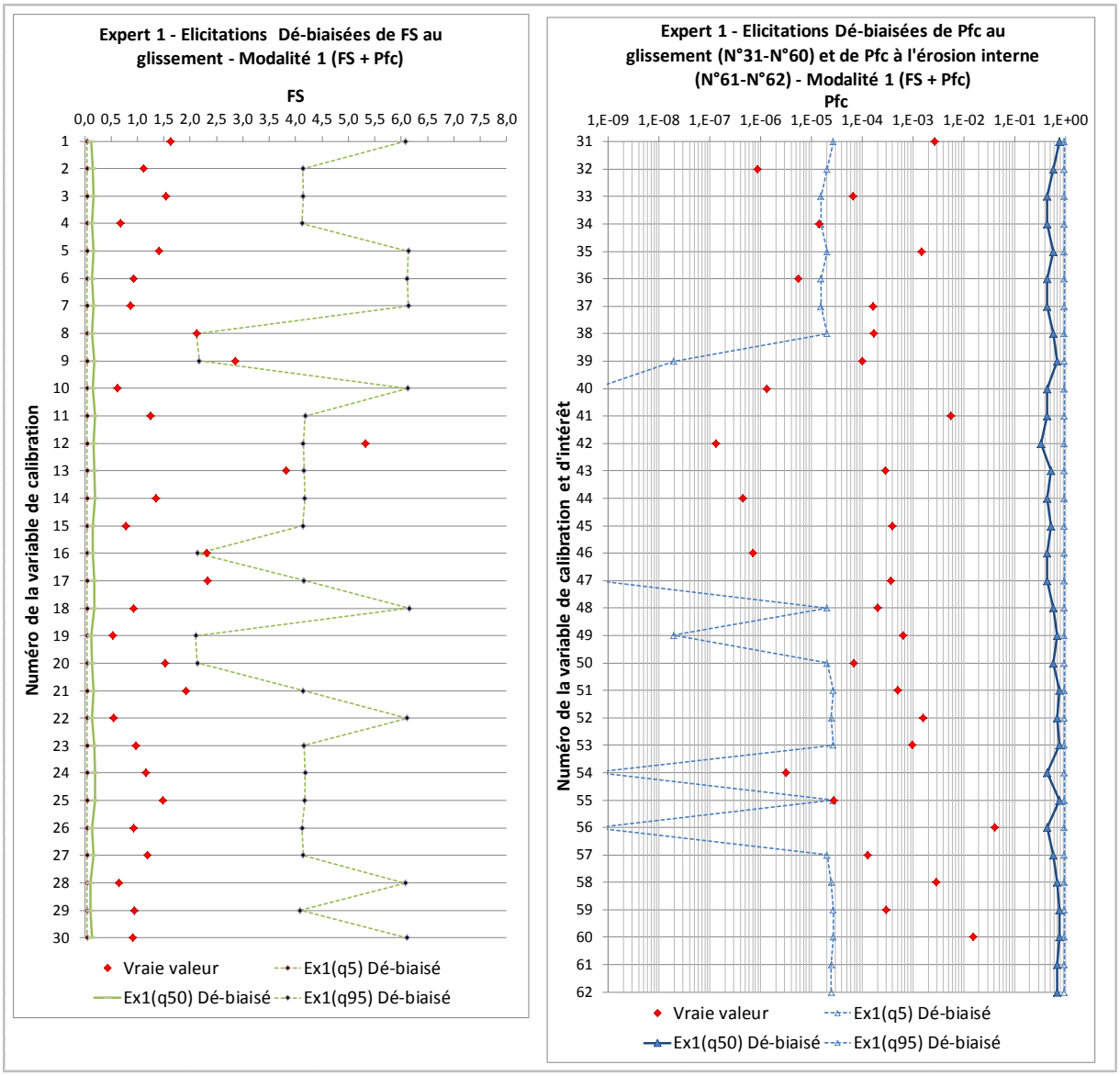


Figure C-7. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (1) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (2) selon la 1ère modalité d'application

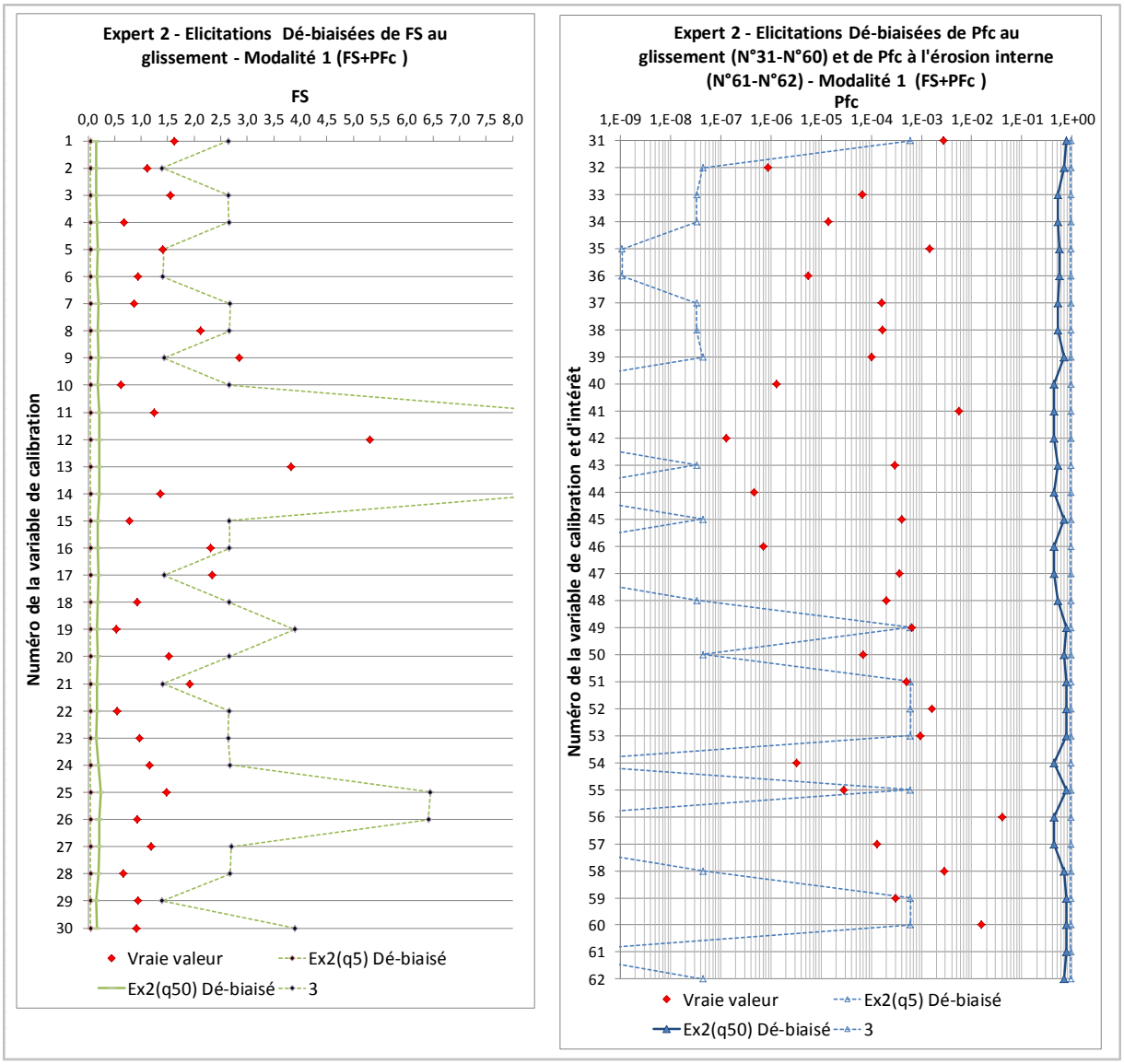


Figure C-8. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (2) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (3) selon la 1ère modalité d'application

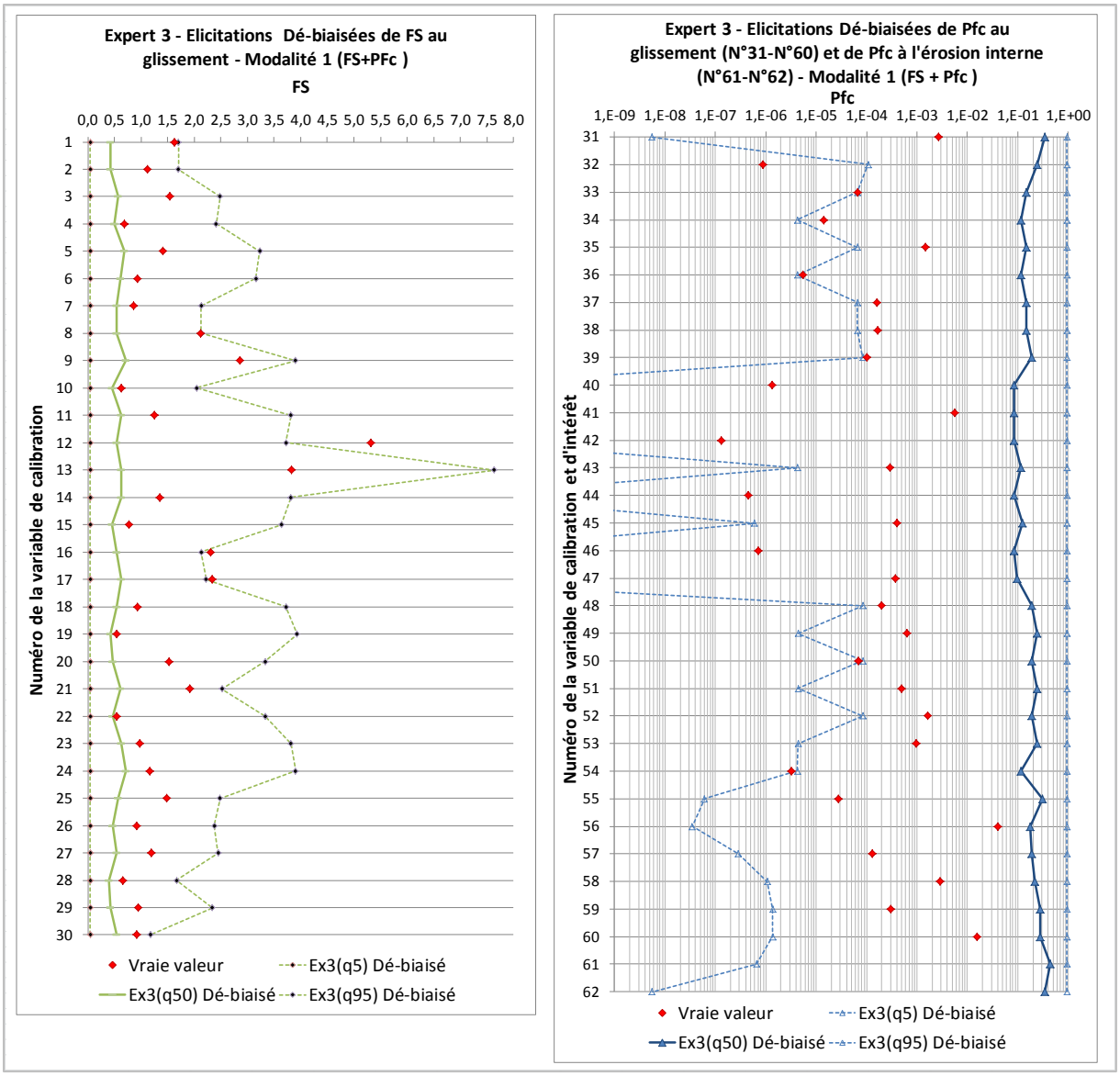


Figure C-9. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert(3) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (4) selon la 1ère modalité d'application

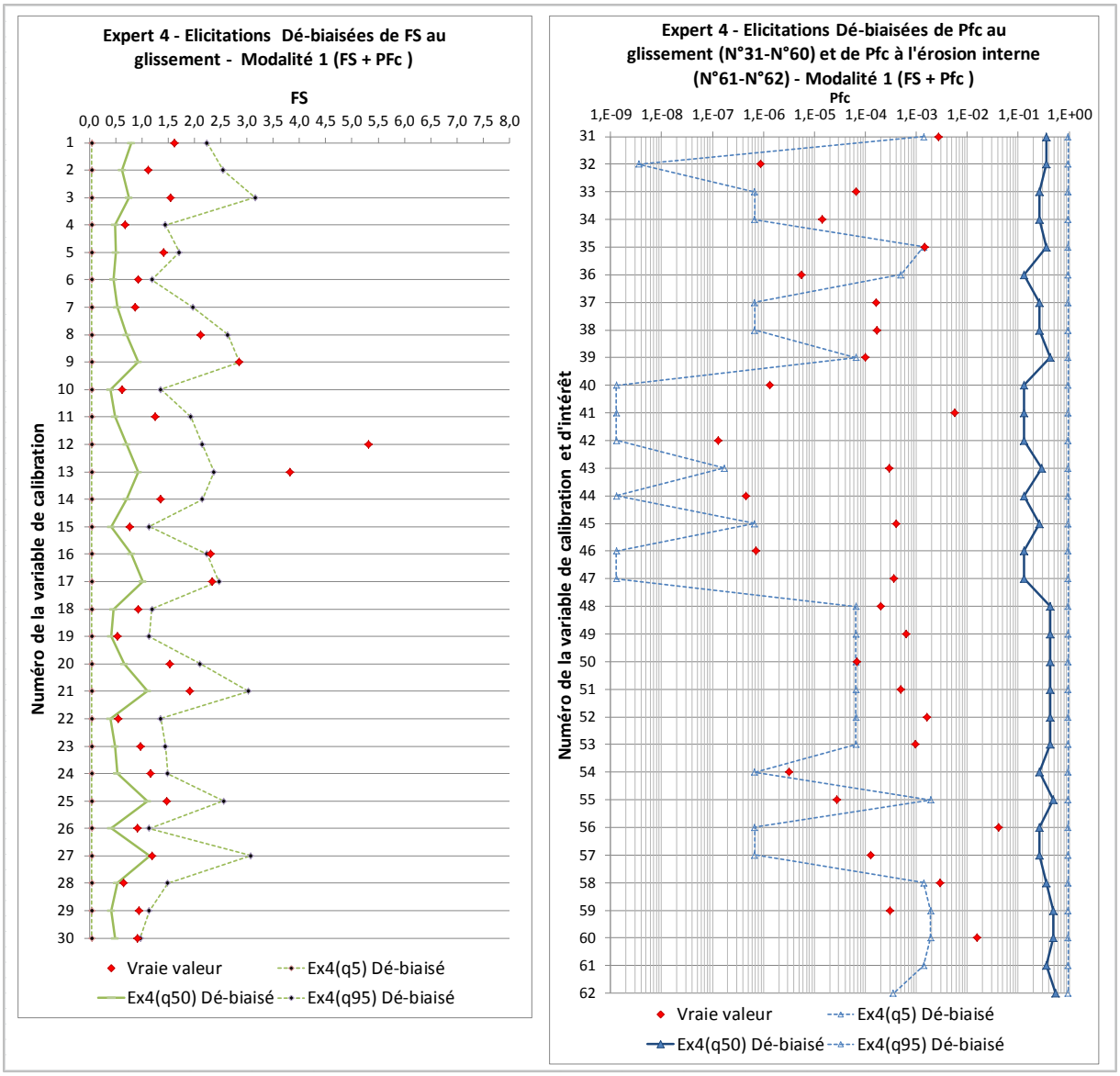


Figure C-10. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert(4) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (5) selon la 1ère modalité d'application

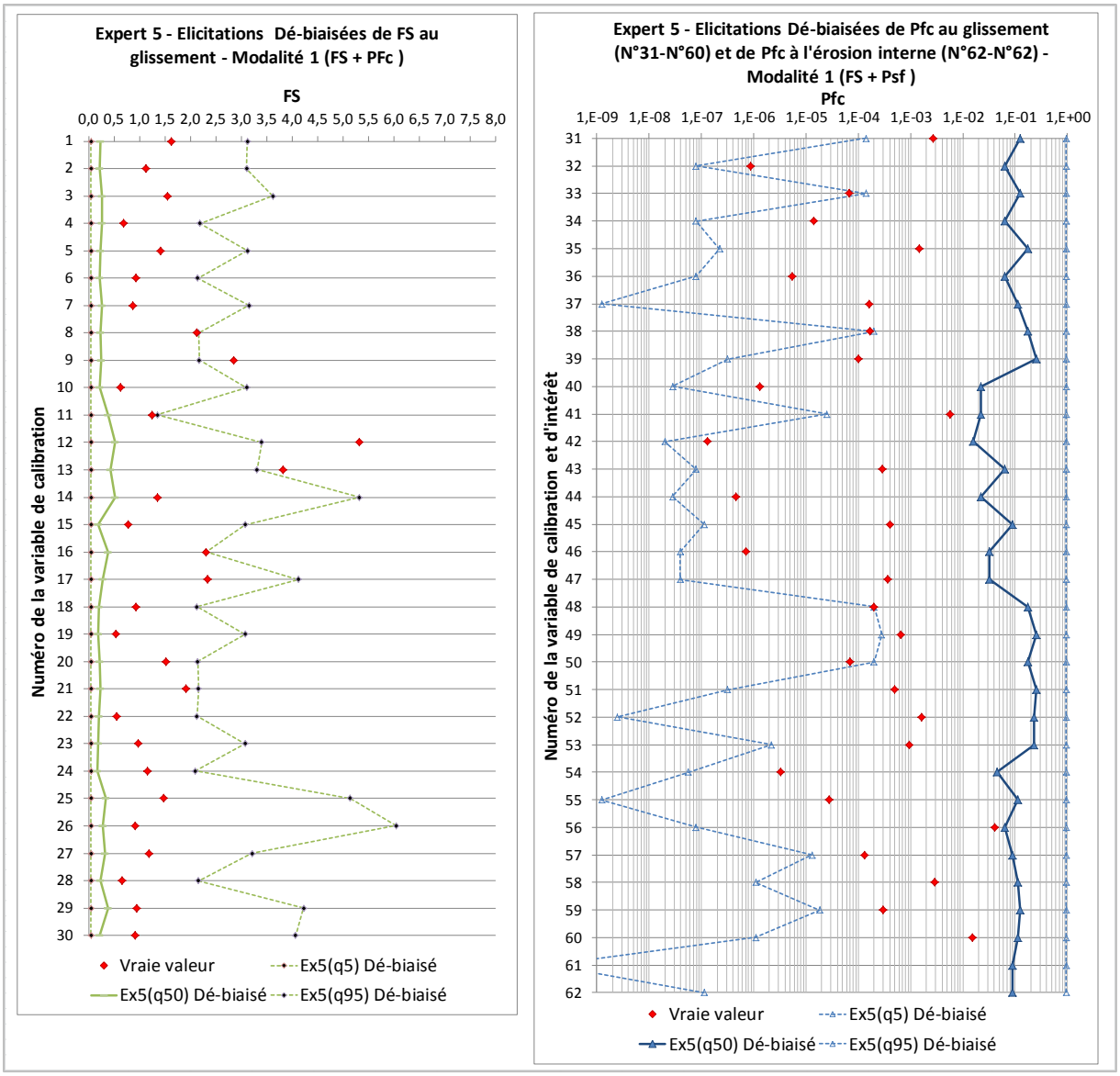


Figure C-11. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert(5) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (6) selon la 1ère modalité d'application

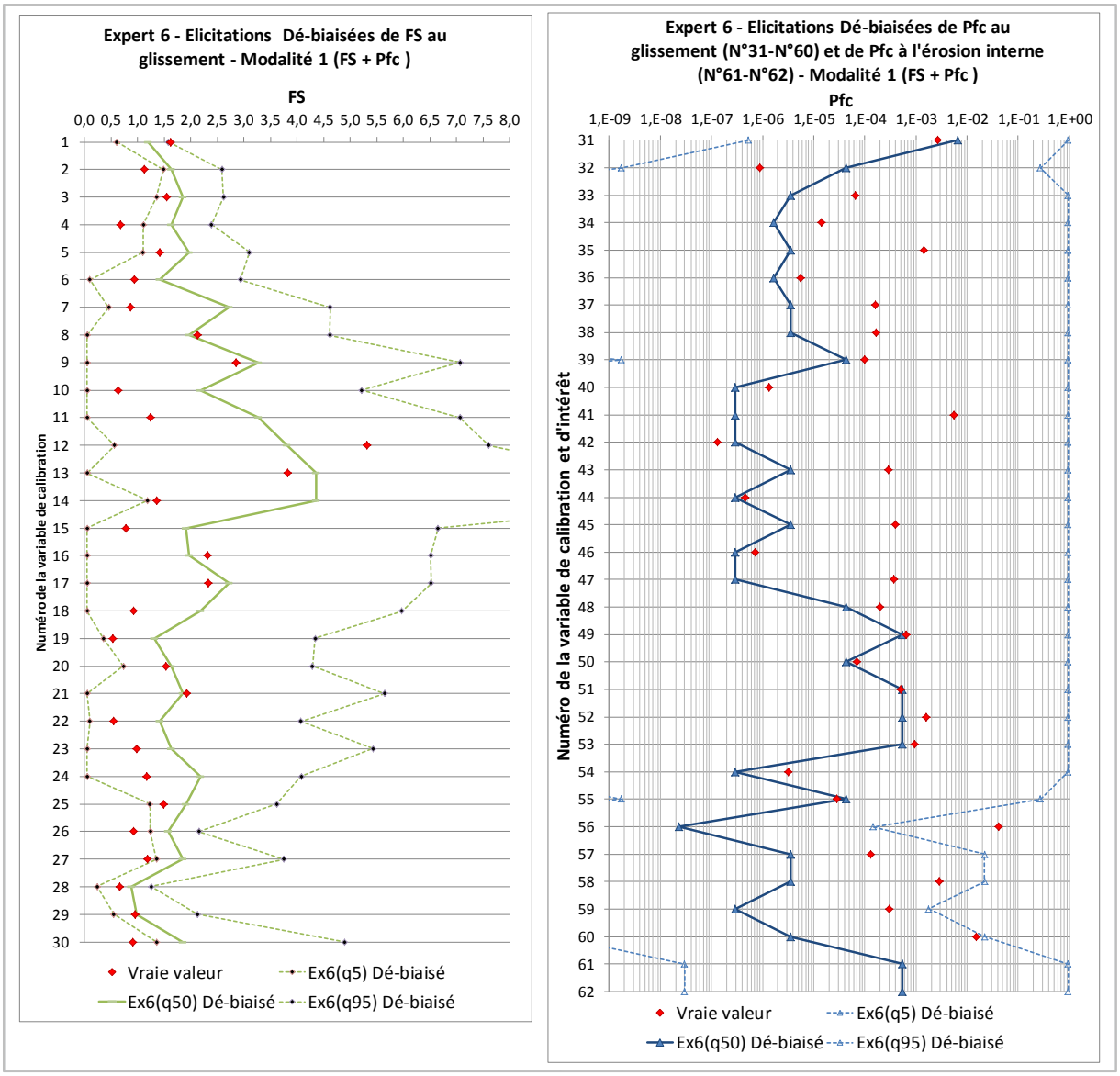


Figure C-12. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert(6) selon la 1ère modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs) et (P_{fc})

Résultat de la phase de Dé-biaisage des avis bruts du panel d'experts – Approche « EiDA » - 2ème modalité

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (1) selon la 2ème modalité d'application

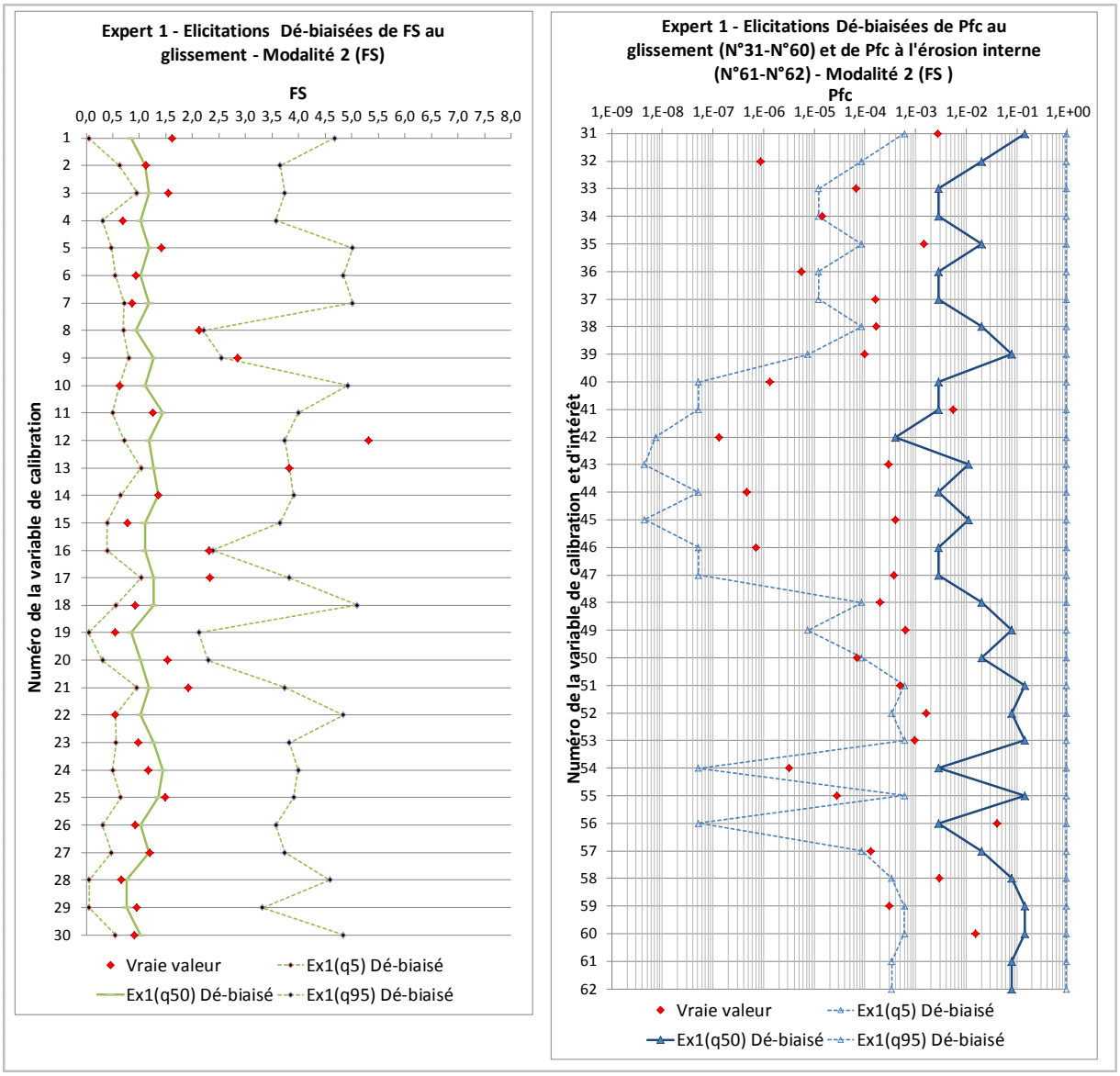


Figure C-13. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (1) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (2) selon la 2ème modalité d'application

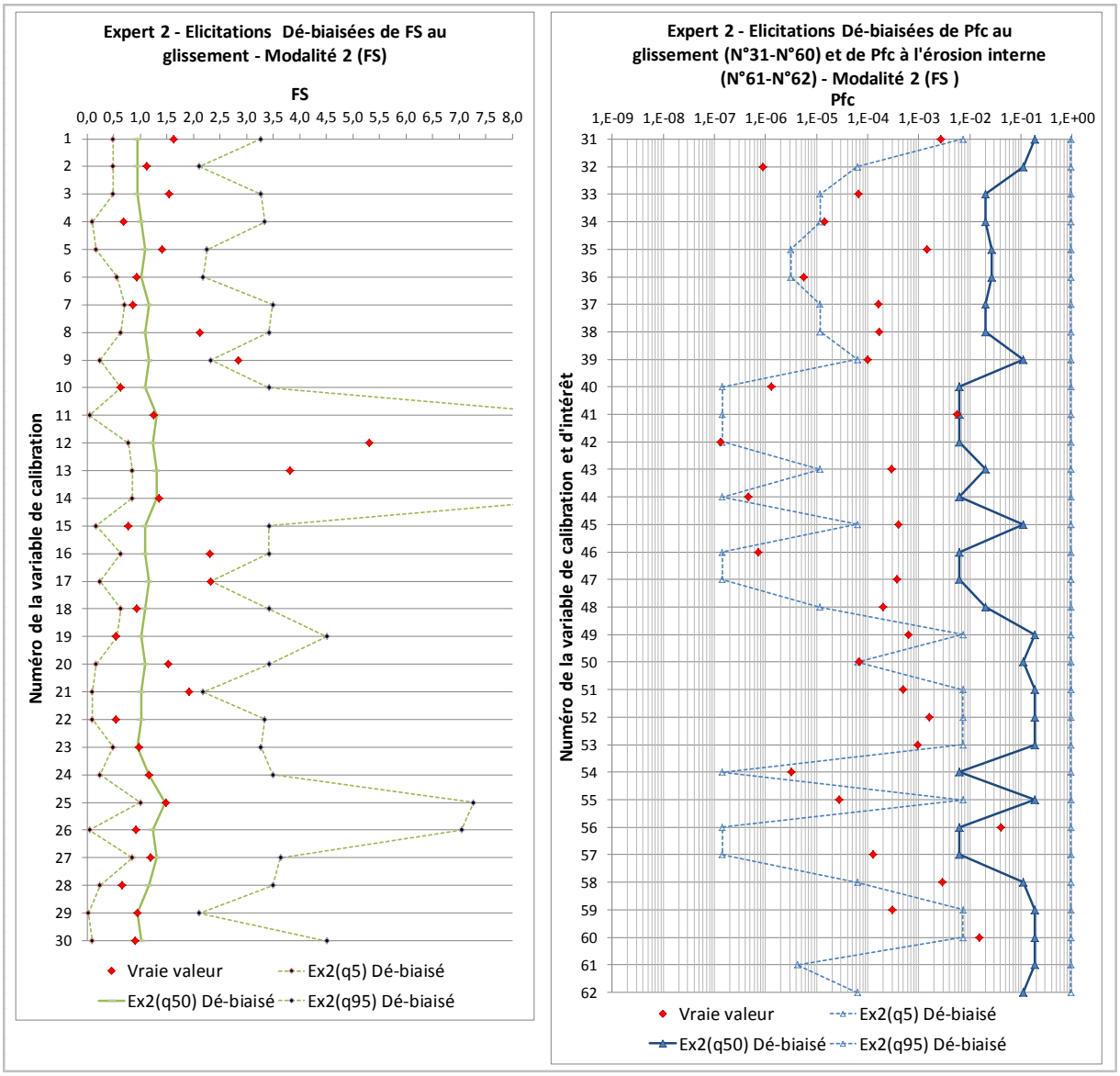


Figure C-14. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (2) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (3) selon la 2ème modalité d'application

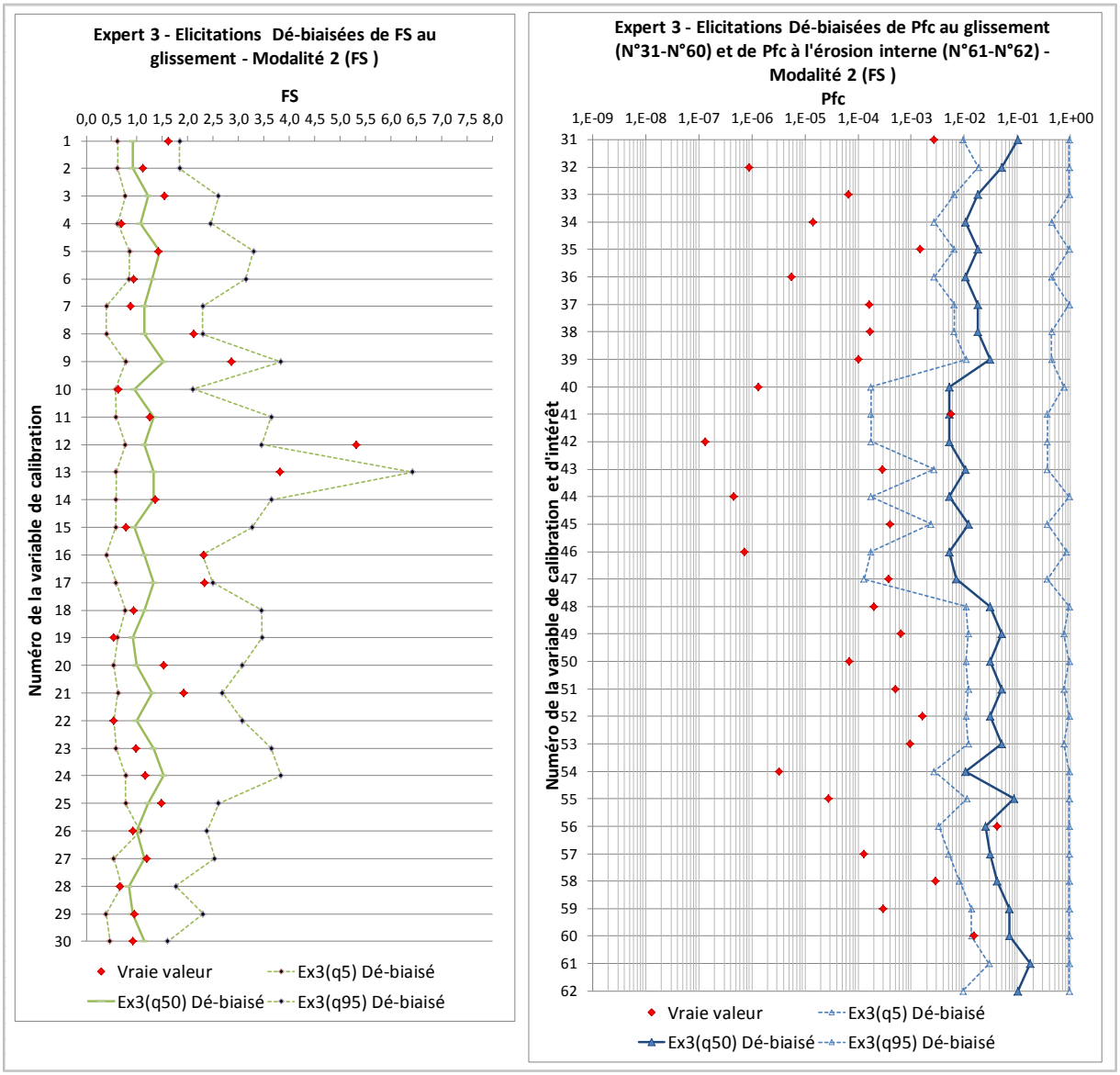


Figure C-15. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (3) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (4) selon la 2ème modalité d'application

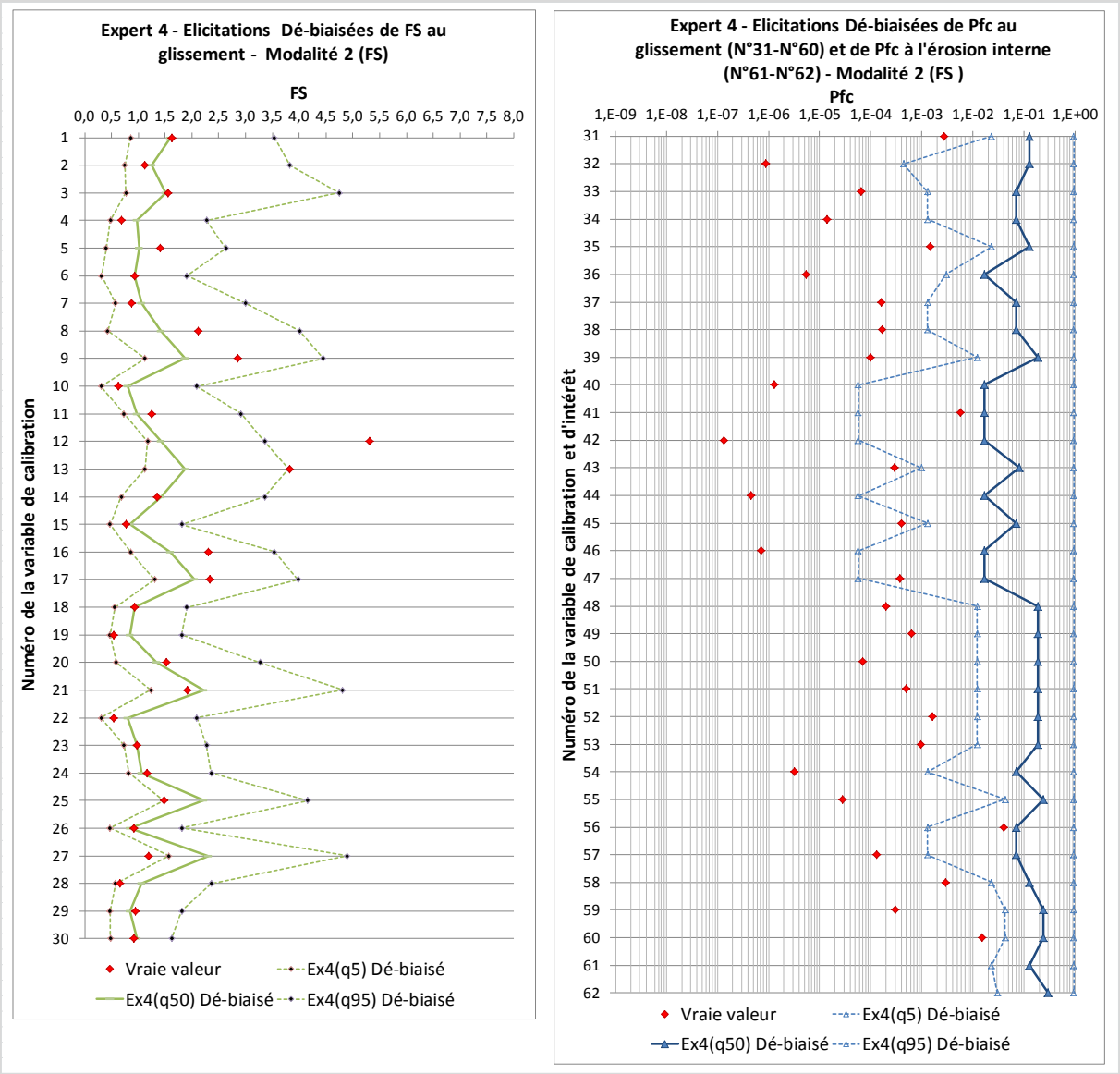


Figure C-16. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (4) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (5) selon la 2ème modalité d'application

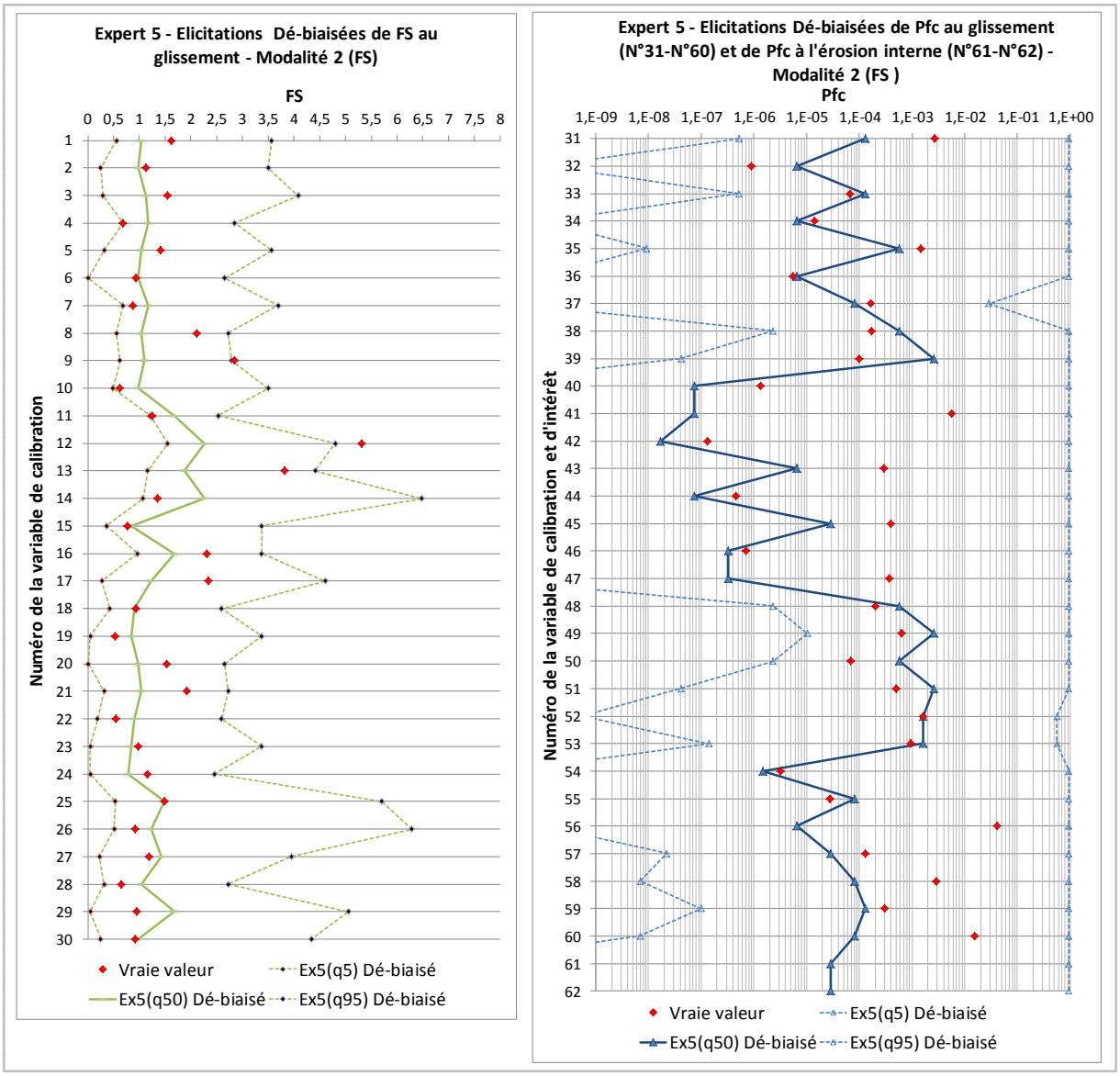


Figure C-17. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (5) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (6) selon la 2ème modalité d'application

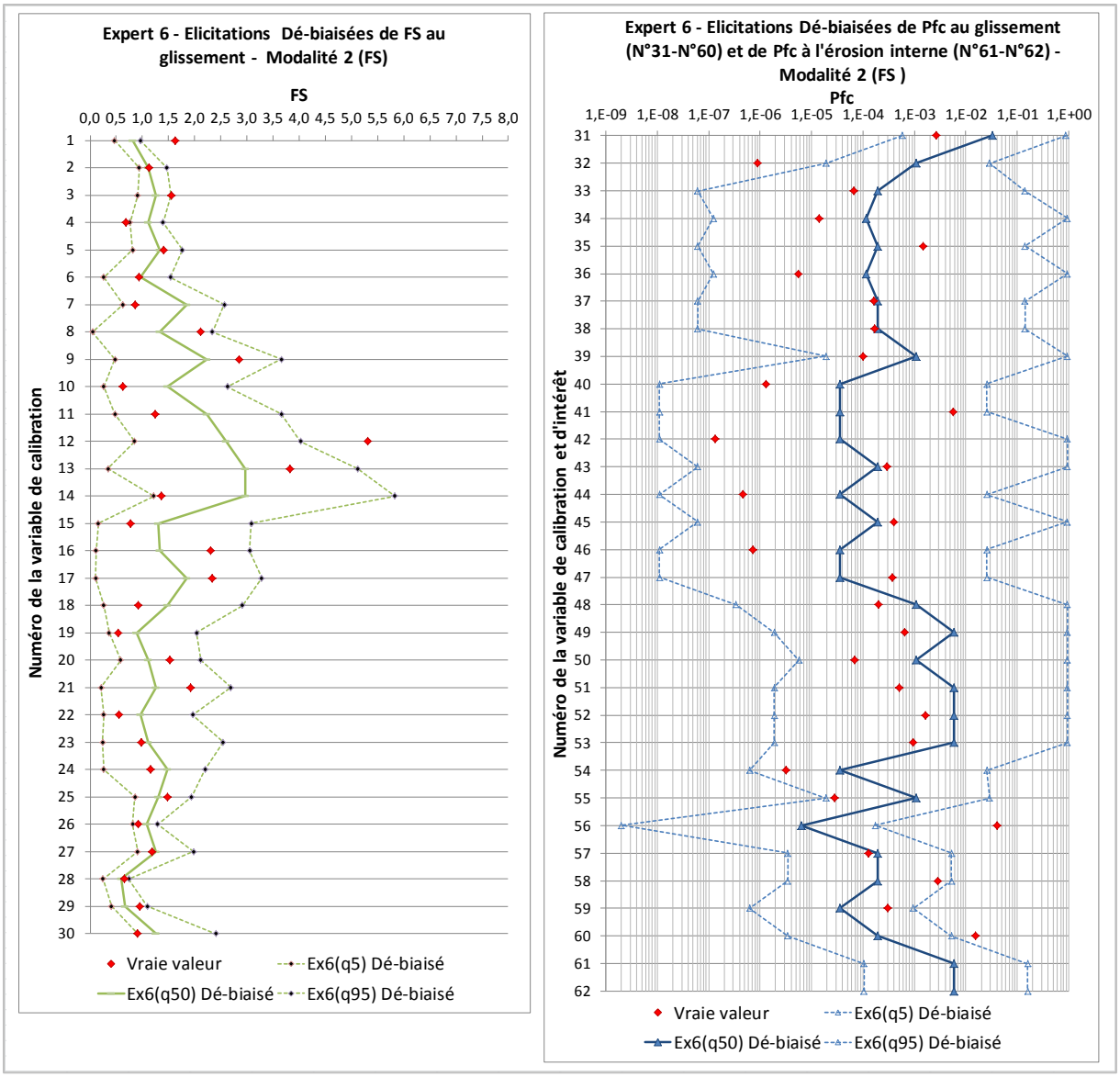


Figure C-18. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (6) selon la 2ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (Fs)

Résultat de la phase de Dé-biaisage des avis bruts du panel d'experts – Approche « EiDA » - 3ème modalité

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (1) selon la 3ème modalité d'application

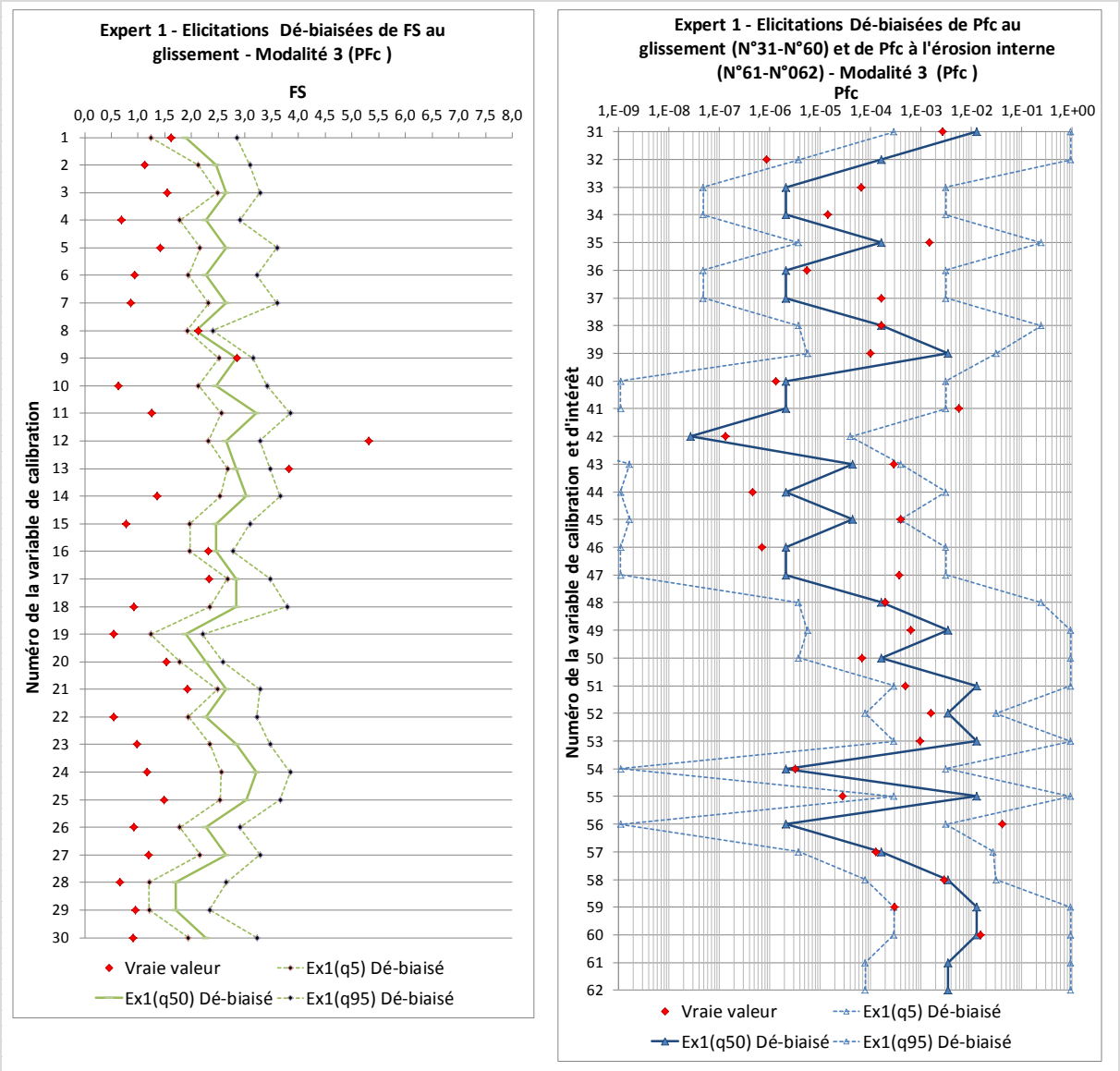


Figure C-19. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (1) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (2) selon la 3ème modalité d'application

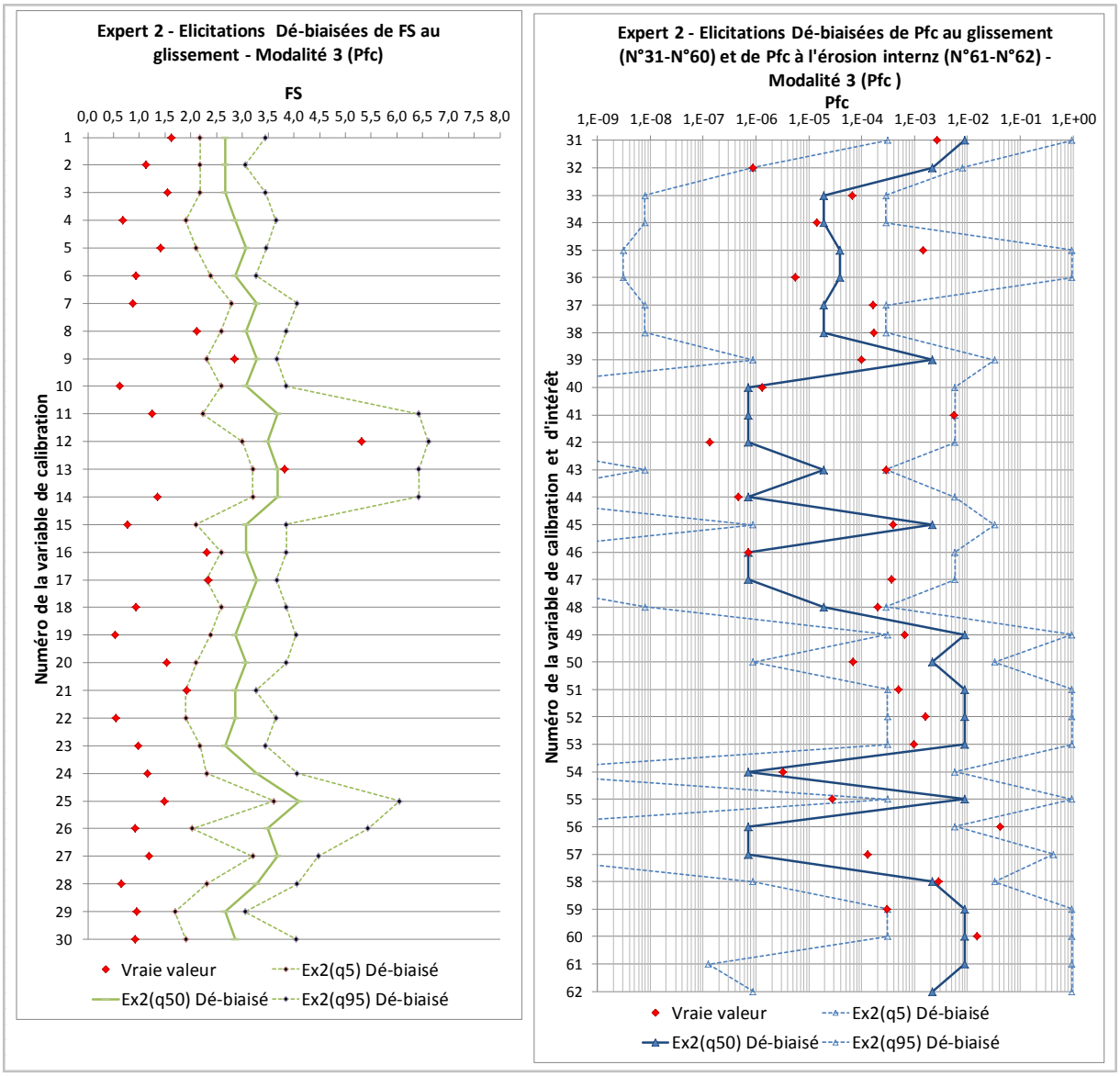


Figure C-20. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (2) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (3) selon la 3ème modalité d'application

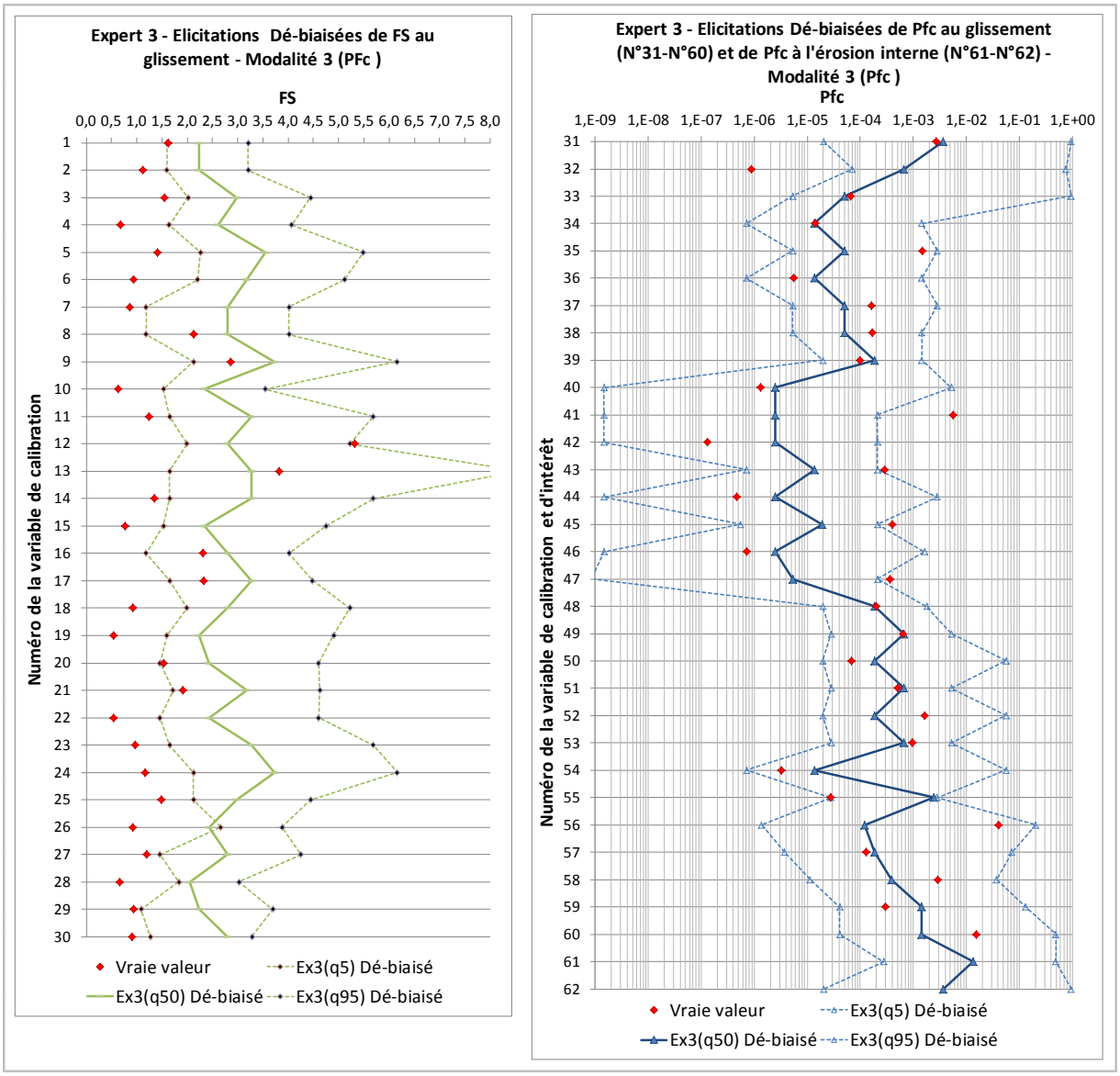


Figure C-21. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (3) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (4) selon la 3ème modalité d'application

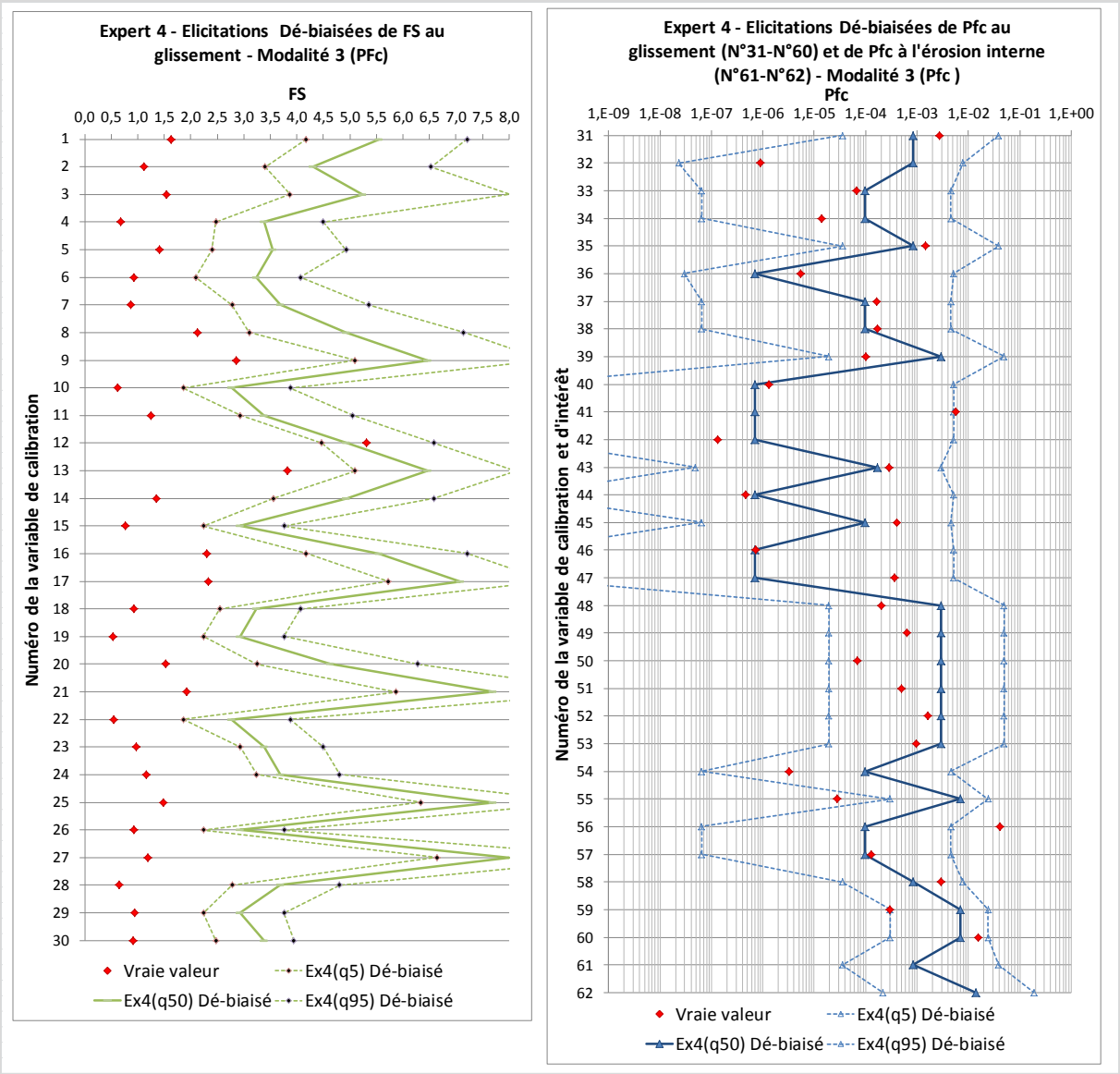


Figure C-22. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (4) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (5) selon la 3ème modalité d'application

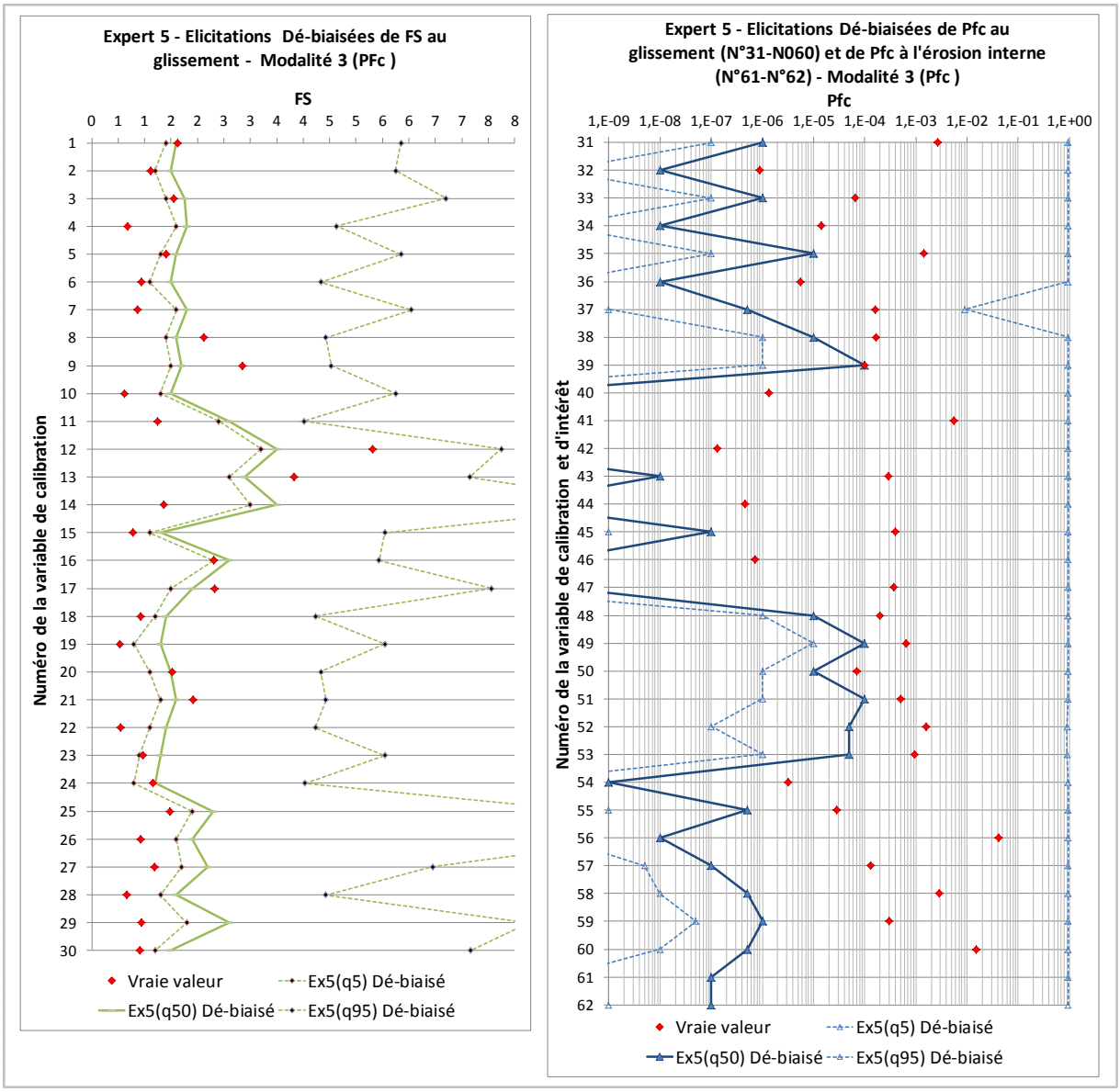


Figure C-23. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (5) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (P_{fc})

Résultats de dé-biaisage des élicitations brutes de l'expert (6) selon la 3ème modalité d'application

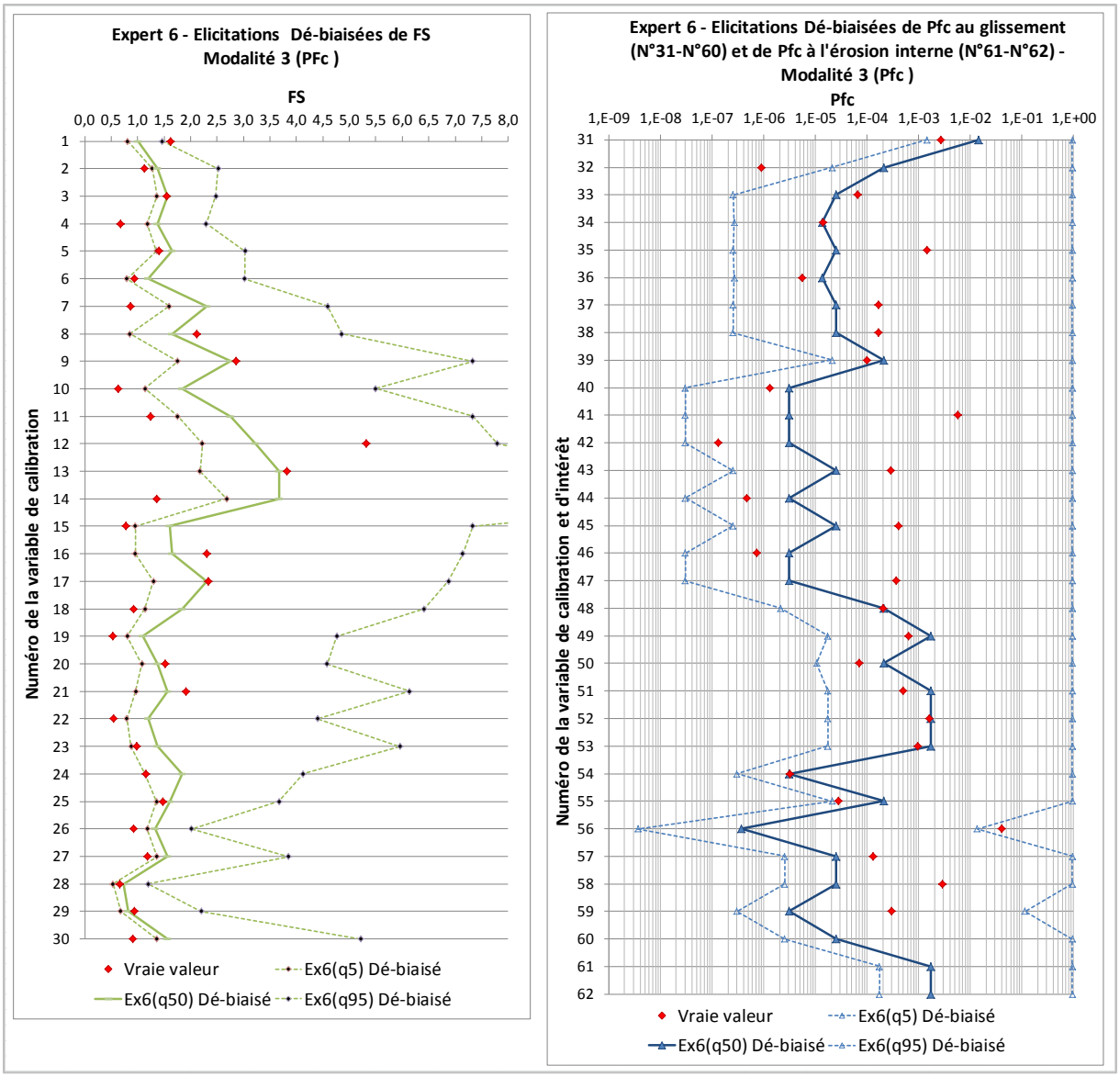


Figure C-24. Distributions dé-biaisées des avis bruts de l'expert (6) selon la 3ème modalité d'application d'« EiDA » pour les variables de calibration (P_{fc})