Méthode d'évaluation de l'impact des composants de construction sur la performance globale (énergétique & environnementale, économique et sociale) d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie

Sara Hadji Rezai

▶ **To cite this version:**

Sara Hadji Rezai. Méthode d'évaluation de l'impact des composants de construction sur la performance globale (énergétique & environnementale, économique et sociale) d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie. Génie civil. Université de La Rochelle, 2017. Français. NNT : 2017LAROS014 . tel-01724635

HAL Id: tel-01724635
https://theses.hal.science/tel-01724635

Submitted on 6 Mar 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 DE LA ROCHELLE

ÉCOLE DOCTORALE
Sciences et Ingénierie en Matériau, Mécanique, Energétique et Aéronautique (SI-MMEA)

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE)

THÈSE

présentée par :

Sara HADJI REZAI

soutenue le 10 juillet 2017

pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de La Rochelle

Discipline : Génie Civil

Méthode d'évaluation de l'impact des composants de construction sur la performance globale (énergétique & environnementale, économique et sociale) d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie

---

JURY :

Charlotte ABELE	Ingénieur R&D, CSTB, Co-Encadrante
Francis ALLARD	Professeur, Université de La Rochelle, Directeur de thèse
Alaa CHATEAUNEUF	Professeur, Polytech Clermont-Ferrand, Rapporteur
Maxime DOYA	Ingénieur R&D, Docteur, TIPEE, Co-encadrant
Ahmed MEBARKI	Professeur, Université Paris-Est Marne-La-Vallée, Rapporteur
Joseph VIRGONE	Professeur, CETHIL, UMR 5008, Examinateur, Président

REMERCIEMENTS

En tout premier, j'aimerai remercier Charlotte Abelé pour m'avoir offert l'opportunité de faire cette thèse. Merci d'avoir proposé ce sujet que j'ai pris plaisir à m'approprier et surtout merci d'avoir choisi de me faire confiance. Un grand merci Charlotte également pour ton écoute, ta compréhension, ton soutien et ta bienveillance.

J'aimerai également remercier mon directeur de thèse, Francis Allard, pour ton temps, ton écoute, ton soutien et tes conseils. Merci aussi Maxime Doya pour m'avoir toujours accordé du temps à chaque passage à La Rochelle et pour tes conseils et ton aide quand j'en ai eu besoin.

Ensuite je souhaite remercier les membres du jury. Merci à Alaa Chateauneuf et Ahmed Mebarki pour avoir rapporté ma thèse. Merci à Joseph Virgone pour avoir présidé le jury. Je souhaite également remercier Martin Guer, Francis Claude et Christophe Gobin pour avoir suivi ma thèse, pour vos conseils, votre temps et votre expertise.

Merci également à Kambiz Kayvantash pour tes précieux conseils, ton temps et ta disponibilité.

Thanks Willy Aspinall for always having taken the time to answer to all my questions.

Merci Andrea Kindinis pour m'avoir offert l'opportunité d'encadrer des TP et des TD à l'Ecole Spéciale des Travaux Publics, du Bâtiment et de l'Industrie.

Merci Sébastien Nouet pour l'aide apporté.

Je souhaite également un grand merci à tous les acteurs de la construction qui ont pris le temps de contribuer à cette thèse et sans qui je n'aurai pu la finaliser telle quelle est aujourd'hui.

Merci à l'ensemble des personnes rencontrées au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Merci Maxime Roger et Michel Cossavella de m'avoir accueilli successivement dans leur direction ainsi que Salem Farkh pour ton accueil au sein de la division Hygrothermique des Ouvrages (HTO). Merci Daniel Quenard pour m'avoir permis de contribuer à l'Annex 65, ainsi que pour tes conseils avisés. Merci Philippe Leblond et Sophie Moreau pour avoir pris le relais dans les derniers moments de la thèse. Merci Lucie Wiatt et Christine Gilliot pour avoir partagé vos connaissances et votre expertise sur les ETICS. Je remercie aussi toute l'équipe de la division Hygrothermique des ouvrages qui m'a accueilli pendant 3 ans et avec qui j'ai partagé des rires et de nombreux bons moments. Un merci spécial Benoit mon alter-ego de bêtise, ainsi que Marion D. pour toutes nos discussions, merci à vous deux de m'avoir offert des moments pour déconnecter de la thèse quand j'en avais besoin. Un merci spécial au pôle Recherche et Expertise de HTO : Rémi, Kamel, Franck, Benoit et Alicia. Un grand merci Marion Robin pour nos déjeuners, nos diners et surtout pour nos séances de grimpe. Un merci aussi à tous mes compagnons de navettes et plus spécialement Laurence pour ton rire contagieux,

Elizabeth pour tous tes précieux conseils mais aussi Manuela, Rachel, Gildas, Sarah, Anne-Sophie et Tamara.

Je remercie l'équipe TIPEE, Maxime, Cécile, Adrien et Jérôme, pour m'avoir accueilli dans votre bureau à chaque visite à l'université de La Rochelle, ainsi qu'au Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement. Un merci spécial à Cécile pour m'avoir permis de contribuer à GRIMOIRE notamment. Merci Jennifer et Isabelle pour m'avoir facilité la partie administrative pendant ces années de thèse. Merci également aux doctorants de La Rochelle avec qui j'ai passé de bons moments, spécialement merci Mathilde pour ton accueil et toutes nos discussions et merci Manon, Guillaume, Thomas et Zaïd.

Un énorme merci à tous mes amis pour votre présence pendant toutes ses années. Merci Loïs pour ton amitié et tes relectures, ainsi que pour tous tes conseils éclairés et merci Wiwi. Merci Elodie C. pour tes conseils sur la thèse et surtout ton support quand j'en ai eu besoin. Merci Julie pour ta Ianitude et ta Nup Nup attitude, ainsi qu'à Pauline. Merci Laetitia et Mirian pour nos weekend de tarées. Merci Sophie pour nos brunchs, nos expos, nos soirées séries sushis et surtout notre passion glace. Merci Elsa pour nos Pho, nos balades et nos discussions. Merci Morgane et Audrey et vive la coinche. Merci aux copains de l'UTC et aux Vendéens pour tous nos weekend, nouvel an, apéros, diners, soirées, brunchs et autres moments passés ensemble : Gre, Mike, Manu, JB, Elodie T., Hugo, Felipe, Vince, Alex, Thomas, Clara, Papi, Marie. Merci aux Putasses parce que vous savez profiter : Mathilde, Thibaud, Alex, Eva, Sandrine, Béa, Laure, Julie, Stuart. Merci aux copains « oisifs » : Lucas, Sylvain, Gaëlle, Zorro, McFly, Rochichou, Constance, Shu, Zineb, Clovis, JP, Thomas, Romain, Cécile, Soiny. Merci Marine et Amandine, malgré la distance. Merci Piou Piou pour ces années d'amitiés et pour enfin m'avoir fait voler. Merci Sarra, parce que c'est toi. Merci ma Yayatte, toi qui partage mon amour pour le bâtiment. Merci « aux filles de SoManyWays » pour votre soutient : Elodie, Marianne, Anaïs, Audrey et aussi Audrey, Gyuzel, Julie, Laura, vous avez su me redonner de la force quand j'en ai eu besoin. Merci à la Team Doctoriales 2014 de Paris-Est, avec un merci spécial à l'équipe 'Les Verts', Anthula, Ioana, Ahmet et Alassane, ainsi qu'à Adrien. Merci aussi Mariela et Christine.

Merci à ma famille. D'abords ma sœur Jules d'être toi et surtout pour m'avoir apporté la joie d'être tata. Merci Saya pour ta joie de vivre, ta curiosité, ton émerveillement et de faire de moi une tata complétement gaga. Enfin un grand merci à mes parents, sans qui je ne serai là aujourd'hui mais surtout pour m'avoir toujours soutenu, épaulé surtout dans les moments difficiles, merci de m'avoir fait confiance quand j'en ai eu besoin, pour ça un grand merci.

RESUME

Aujourd'hui les attentes en terme de performance énergétique, environnementale, mais également économique et sociale, toujours de plus en plus élevées, rendent de plus en plus complexe l'acte de construire et compliquée la prise de décision en phase de conception. Aussi l'enjeu de demain est notamment d'accompagner les acteurs de la construction dans le choix de composants de construction les moins risqués et les plus appropriés pour un projet de construction donné.

Cette thèse est née de la volonté de répondre à cet enjeu. Aussi, l'objectif de cette thèse a été de développer une méthode d'évaluation de l'impact de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale (énergétique, environnementale, économique et sociale) d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie.

L'appropriation de la culture du risque, son appréciation (identification, analyse et évaluation), ainsi que son management dans le domaine de la construction est un phénomène récent, encore principalement à l'état de recherche. Cependant d'autres domaines tels que le nucléaire, l'aéronautique ou la finance ont déjà acquis des connaissances, développé des outils, méthodes et techniques et mis en exergue des bonnes pratiques et des précautions à suivre. Ainsi nous avons choisi de nous appuyer sur cela pour développer notre méthode et notamment nous avons fait le choix d'utiliser la méthode classique de Cooke (1991) pour pondérer les jugements d'experts et s'assurer qu'ils soient les plus représentatifs de la réalité.

La méthode proposée ici se décompose en trois étapes. La première est une étape préliminaire qui permet d'une part de définir les objectifs de performance à atteindre pour un bâtiment performant en construisant une famille d'indicateurs de performance et d'autre part de choisir entre les deux étapes suivantes. Soit le composant de construction est largement diffusé et le processus principal est mis en œuvre. Soit il est innovant et c'est le processus secondaire qui est mis en œuvre. *In fine* la méthode permet :

- D'identifier les couples 'aléa/risque' associés au composant étudié (composant largement diffusé ou innovant) ;
- De mettre en évidence, grâce à l'aide d'un jeu de poids pondérant les indicateurs de performance représentant la performance globale à atteindre pour un bâtiment donné :
    - Les indicateurs les plus sensibles au regard de ce composant (composant largement diffusé) ;
    - L'impact de l'intégration du composant via les couples 'aléa/risque' recensés sur tout le cycle de vie du bâtiment à l'échelle du composant et à l'échelle du bâtiment (composant largement diffusé).

Elle a été expérimentée sur deux composants de construction, l'un largement diffusé, l'autre innovant et cela a permis de mettre en exergue ses avantages, limites, perspectives et améliorations d'un point de vue théorique. Mais également d'identifier des bonnes pratiques, des risques et des apprentissages associés à sa mise en application.

Sa force réside dans son déploiement à grande échelle. Plus elle sera mis en œuvre sur un grand nombre de composants de construction d'une même famille et plus elle apportera un intérêt dans l'aide à la conception grâce à la comparaison entre ces composants afin de choisir le plus approprié et le moins risqué pour un projet de construction donné.

SOMMAIRE

Remerciements ..... **III**

Résumé ..... **V**

Sommaire ..... **VII**

Liste des Figures ..... **XI**

Liste des tableaux ..... **XIII**

Note au lecteur **1**

Introduction **3**

PARTIE 1 : Le risque et la construction **7**

CHAPITRE 1 : Contexte et positionnement de la recherche **11**

I. État de l'art du risque dans la construction 13

II. De l'intérêt de la prise en compte de la complexité et de l'incertitude 20

III. Contexte et problématique 24

IV. Conclusion 26

CHAPITRE 2 : Apprécier le risque **27**

I. Définir les concepts 28

II. Appréciation du risque 34

III. Direction choisie pour répondre à la problématique 36

IV. Conclusion 37

CHAPITRE 3 : Combiner les jugements d'experts **39**

I. Comment choisir un 'bon' expert ? 40

II. Eliciter les dire d'experts 42

III. Combiner les jugements d'experts 43

IV. Modèle classique de Cooke 45

V. Procédure de jugement d'expert structuré – EXCALIBUR Procedure 53

VI. Conclusion 54

PARTIE 2 : Méthode d'évaluation de l'impact de l'intégration d'un composant sur la performance globale du bâti 57

CHAPITRE 1 : Composants de construction 59

I. Définir un composant de construction 60

II. Distinguer les composants de construction 60

III. Conclusion 62

CHAPITRE 2 : Description de la méthode 63

I. Processus préliminaire 66

II. Processus principal : Les composants largement diffusés 67

III. Processus secondaire : les composants innovants 81

IV. Conclusion 84

PARTIE 3 : Résultats et Discussion 87

CHAPITRE 1 : Resultats du cas d'étude 'composant largement diffusé' – isolation thermique par l'extérieur sous enduit (ETICS) 91

I. Principe de l'isolation thermique par l'extérieur sous enduit – ETICS 92

II. Résultats – composant largement diffusé : ETICS 93

III. Conclusion sur les résultats 117

IV. Conclusion 124

CHAPITRE 2 : Resultats du Cas d'étude - composant innovant – Panneau Isolant sous Vide (PIV) 125

I. Principe du Panneau Isolant sous Vide - PIV 126

II. Résultats – composant innovant : PIV 127

III. Conclusion sur les résultats 139

IV. Conclusion 142

CHAPITRE 3 : Discussions 143

I. La méthode, l'expérimentation et l'apport dans le domaine 144

II. Discussions sur les bases théoriques de la méthode 145

III. Discussions sur l'expérimentation et le déroulement de la méthode 150

IV. Conclusion 152

CHAPITRE 4 : Valorisation de la Méthode 153

I. Aide à la décision (conception, construction, gestion, amélioration) 156

II. Formation (processus d'amélioration continue) 162
III. Information (diagnostique, identification du risque) 162
IV. Aide à l'évaluation 162
V. Conclusion 163

Conclusions et perspectives 165

Bibliographie 169

Annexes 177

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Modélisation du risque inspirée de celle de Le Ray [Le Ray, 2012] 29
Figure 2 : Matrice d'évaluation des risques [Le Ray, 2012] 32
Figure 3 : Matrice sommaire de risques – projet, encadrée (niveau 2) [GERMA, 2012] 33
Figure 4 : Distribution de probabilités cumulative et subjective 43
Figure 5 : Schémas comparant des experts plus ou moins bien calibrés et informatifs sur les questions de calibrations, (extrait d'un schéma) [Aspinall, 2008] 46
Figure 6 : C2P : un outil d'analyse de risques pour les assureurs construction permettant de distinguer les techniques courantes des techniques non courantes [AQC, 2017e] 62
Figure 7 : Méthode d'évaluation de l'impact d'un composant de construction intégré sur la performance globale (environnementale, énergétique, économique et sociale) du bâtiment sur tout son cycle de vie 65
Figure 8 : Explication préalable au questionnaire de calibration des experts 71
Figure 9 : Ensemble des composants de base constituant un ETICS [EAE, s.d., a] 93
Figure 10 : Diagramme radar présentant la sensibilité des indicateurs de performance au regard de l'impact minimum et maximum des couples 'aléa/risque' pour la pondération des experts au regard de leur performance à exprimer un jugement 119
Figure 11 : Diagramme radar présentant les aléas les plus préjudiciables pour le composant ETICS pour le 75e quantile pour la pondération des experts au regard de leur performance à exprimer un jugement 121
Figure 12 : Diagramme radar présentant les aléas les plus préjudiciables pour la performance du bâtiment pour l'impact des couples 'aléa/risque' maximum rencontrés par les experts dans le cas de l'ETICS pour la pondération des expert au regard de leur performance à exprimer un jugement 122
Figure 13 : Ensemble des composants de base constituant un PIV (source : Va-Q-Tec) 127
Figure 14 : Diagramme radar présentant la sensibilité des indicateurs de performance au regard de l'impact minimum et maximum des couples 'aléa/risque' pour une pondération équiprobable 141
Figure 15 : Trois jeux de pondération des indicateurs de performance représentant trois performances globale à atteindre hypothétiques différentes (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) 157

Figure 16 : représentation de certaines mesures (médiane, quartiles, intervalle interquartiles) 189

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Définitions du risque issues des normes françaises, européennes, internationale et d'ouvrages relatifs à l'analyse des risques [Talon, 2006] 30
Tableau 2 : Elicitation des distributions de probabilité subjectives pour 10 variables de calibration pour l'expert a 49
Tableau 3 : Explication pour déterminer la distribution d'échantillonnage de l'expert a 49
Tableau 4 : Information nécessaire pour identifier les couples 'aléa/risque' (avec un exemple dans le cas des panneaux isolants extérieurs sous enduits) 68
Tableau 5 : Exemples de questions formulées dans le questionnaire de calibration, ainsi que le type de réponse attendue 72
Tableau 6 : Organisation de la matrice d'aléas pour un composant de construction (avec un exemple de remplissage par un expert pour un couple 'aléa/risque') ... 76
Tableau 7 : Organisation des données pour l'identification des indicateurs les plus sensibles 80
Tableau 8 : Organisation des données pour l'identification des aléas les plus préjudiciables 80
Tableau 9 : Exemple de questionnaire pour le processus secondaire 83
Tableau 10 : Distinction domaine traditionnel ou non et technique courante ou non pour les ETICS et les PIV 89
Tableau 11 : Famille d'indicateurs de performance 96
Tableau 12 : Tableau consignant l'identification des couples aléa/risque issus des différentes sources d'informations potentielles (bases de données, littératures, spécialistes du composant étudié) 99
Tableau 13 : Identification des couples 'aléa/risque' pour le procédé ETICS 100
Tableau 14 : Réponses des experts (E1 à E7) au questionnaire de calibration (cf Annexe D) – en gras les valeurs estimées par l'expert encadrant la valeur réelle, la ligne de la question de calibration 8 est grisonnée car non prise en compte puisque l'expert E7 n'a pas su répondre 107
Tableau 15 : Poids des experts au regard de leur performance à exprimer un jugement 108
Tableau 16 : Poids des experts au regard des trois types de pondérations (équiprobable, au regard de leur performance à exprimer un jugement, au regard de leur expérience) pour combiner les données 112

Tableau 17 : Précision statistique des experts issue de la méthode classique de Cooke (1991) 113
Tableau 18 : Classement de la sensibilité des indicateurs au regard du type de pondération choisi pour combiner les données des experts (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) - ETICS 114
Tableau 19 : Classement des aléas en fonction de leur impact sur la performance globale au regard du type de pondération choisi pour combiner les données des experts (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) - ETICS 115
Tableau 20 : Classement des aléas (pour le quantile 75%) en fonction de leur impact sur le composant au regard du type de pondération choisies pour combiner les données des experts (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) - ETICS 116
Tableau 21 : Identification des couples 'aléa/risque' après traitement et tri de l'information obtenue via le questionnaire auprès du panel d'experts 'PIV' 132
Tableau 22 : Classement de la sensibilité des indicateurs avec une combinaison des données pour une pondération équiprobable - PIV 138
Tableau 23 : Intérêts et usages de la méthode pour les différentes catégories d'acteurs de la construction 155
Tableau 24 : Comparaison de la sensibilité des indicateurs de performance dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance 159
Tableau 25 : Comparaison du classement des aléas les plus préjudiciables dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance 160
Tableau 26 : Exemple de tableau statistique 187
Tableau 27 : Médiane sur les résultats des 7 experts pour chaque indicateur de performance en prenant la somme des impacts de chaque couple 'alea/risque' sur chaque indicateur de performance pour les trois types de pondérations pour combiner les données des experts - ETICS 195
Tableau 28 : Classement de la sensibilité des indicateurs au regard du type de pondération pour combiner les données des experts – ETICS 197

Tableau 29 : Médiane sur les résultats des 7 experts pour chaque alea en prenant la somme des impacts de chaque couple 'alea/risque' sur chaque indicateur de performance pour les trois types de pondération pour combiner les données des experts– ETICS 199
Tableau 30 : Combinaison des distributions de l'impact des couples 'alea/risque' sur le composant des 7 experts pour les trois types de pondérations – ETICS 201
Tableau 31 : Médiane sur les résultats des 9 experts pour chaque indicateur de performance en prenant la somme des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance avec la combinaison des données pour une pondération équiprobable - PIV 203
Tableau 32 : Classement de la sensibilité des indicateurs avec une combinaison des données pour une pondération équiprobable – PIV 205
Tableau 33 : Comparaison de la sensibilité des indicateurs de performance dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance 207
Tableau 34 : Comparaison du classement des aléas les plus préjudiciables dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance 211
Tableau 35 : Qualités, limites et perspectives de la méthode 213
Tableau 36 : Bonnes pratiques, problèmes et apprentissages suite à l'expérimentation de la méthode 217

NOTE AU LECTEUR

« Non-axiomes

Pour être sain d'esprit et adapté, il faut qu'un individu se rende compte qu'il ne peut connaître tout ce qu'il y a à connaître. Il n'est pas suffisant de comprendre cette limitation sur le plan intellectuel. Cette compréhension doit être un processus ordonné et conditionné sur le plan inconscient comme sur le plan conscient. Un tel conditionnement est essentiel à une recherche équilibrée de la connaissance. »

Les joueurs du $\bar{A}$, A.E. Van Vogt

(Traduction de l'américain par Boris Vian)

La thèse est à mon sens le début d'une aventure scientifique, la découverte d'un certain nombre de questionnements amenés à évoluer. Ces questionnements ne sont pas seulement liés au sujet étudié mais aussi liés aux domaines d'études dans lesquels s'inscrit la thèse et surtout au domaine Scientifique. C'est l'ouverture sur un mode de pensée qui encourage l'esprit critique et l'échange. C'est une invitation à la découverte et au changement de regard.

La thèse de doctorat que vous allez lire est une vision à un instant t suite à plusieurs années de recherche d'une part bibliographique, d'autre part expérimentale ainsi qu'à une réflexion et des échanges divers et variés autour d'une problématique. Cette thèse est une proposition amenée à être confrontée. Les termes définis ici le sont dans la limite de ma compréhension et de mes connaissances. Aussi je suis ouverte à la discussion, à la confrontation d'idées et de point de vue puisque je crois qu'ils peuvent évoluer. Ma vérité du moment ne sera probablement pas ma vérité à l'instant suivant. De mon point de vue, chacun construit sa vérité qui peut ou pas correspondre aux vérités et aux attentes des autres. Attentes qui sont également amenées à évoluer au regard de notre compréhension du monde, du domaine concerné. Il existe autant de vérités, que de visions propres à chacun et par conséquent de propositions possibles. A chacun d'y prendre ce qui lui semble juste et de rejeter le reste si bon lui semble. Ma thèse est une proposition qui permet d'ouvrir une brèche et d'engager une réflexion. Merci pour votre temps engagé à me lire et à échanger. Bonne lecture et bonne réflexion.

INTRODUCTION

« Parce qu'il conçoit et produit des objets techniques complexes, le secteur de la construction et de l'aménagement, soumis aux crises énergétiques, environnementales, économiques et sociales s'est profondément transformé au cours des dernières décennies. »

Pierre Michel

Article "Nos bâtiments à l'épreuve de la vie », Pierre Michel dans revue Millénaire3 – M3 – Société et action publique Pour penser les mutations – N°7 – Printemps/Été 2014

L'un des enjeux majeurs dans le secteur de la construction réside dans la conception et la construction de bâtiments dits performants. Ce sont des bâtiments atteignant une performance dite globale, regroupant les performances non seulement énergétique et environnementale, mais également économique et sociale (usages, conforts, sécurités). De plus, les ouvrages et produits de construction doivent répondre aux 7 exigences fondamentales du Règlement (UR) n°305/2011 [RPC, 2011] : 'Résistance mécanique et stabilité, Sécurité en cas d'incendie, Hygiène, Santé et environnement, Sécurité d'utilisation et accessibilité, Protection contre le bruit, Économie d'énergie et isolation thermique, Utilisation durable des ressources naturelles'. En outre, sont également demandés des niveaux de performance de plus en plus élevés.

Aussi, devient-il délicat de s'assurer que le choix des composants de construction pour bâtir ou rénover un bâtiment visant un certain niveau de performance (énergétique par exemple) ne se fera pas au détriment d'autres performances (le confort et/ou la sécurité par exemple) conduisant à une dégradation de sa performance globale. En effet, les composants de constructions influencent la performance globale du bâtiment et ce sur tout son cycle de vie. Ainsi garantir qu'un composant permet au bâtiment, dans lequel il est intégré, d'atteindre sa performance globale est un défi que le domaine du bâtiment doit relever.

Pour répondre, en partie, à cette problématique, certains processus actuels permettent d'évaluer les composants de constructions et les risques associés :

- La Commission Chargée de Formuler des Avis Techniques (CCFAT) propose une évaluation technique des composants non traditionnels, afin de limiter les risques de pathologies ;

- La Commission Prévention Produits mis en œuvre (C2P) au sein de l'AQC (Agence Qualité Construction), permet d'identifier les techniques susceptibles d'engendrer des risques sinistres et indique une appréciation du niveau de risque ;

- L'AQC a créé une base de données Retours d'Expériences dans les Bâtiments Performants (REX BP) se focalisant sur les pathologies émergentes en lien avec la mise en œuvre (MEO) de composants innovants impactant les performances prévues (confort, qualité sanitaire, …), afin de permettre un apprentissage par l'erreur pour l'amélioration de la qualité.

En outre, certains travaux de recherche se sont également déjà intéressés à la question :

Notamment au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment où trois thèses ont été menées par Lair (2000), Talon (2006), Bazzana (2011) concernant la conduite de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets et de la Criticité ou AMDE(C). Ces travaux avaient pour but d'aider à l'évaluation de la durée de vie de composants de construction par la capitalisation des informations. L'AMDE a d'abord été adaptée au secteur du bâtiment par Lair. Puis une méthodologie complète utilisant l'AMDEC sur plusieurs étapes du cycle de vie (conception, mise en œuvre, exploitation) a été proposée par Talon. Enfin Bazzana a créé un outil logiciel d'aide à la conduite d'AMDE destiné au domaine du bâtiment pour automatiser l'analyse de défaillance des composants de construction. Cependant, bien que la méthodologie proposée concerne l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, elle est coûteuse en temps et ne permet pas de connaitre l'influence du composant étudié au regard d'un ensemble d'objectifs de performance choisis pour le bâtiment et représentant sa performance globale.

C'est dans ce contexte qu'est née cette thèse, codirigée par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et le Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) de l'Université de La Rochelle. Elle a pour objectif d'**estimer l'influence de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie**. Autrement dit, d'évaluer comment l'intégration d'un composant de construction va impacter le bâtiment dans l'atteinte et le maintien de sa performance globale tout au long de sa vie.

Pour cela un travail de thèse a été mené afin de proposer une méthode répondant à cet objectif. Dans un premier temps, une revue bibliographique a permis de faire un inventaire des outils et méthodes existants dans de nombreux domaines tels que le nucléaire, l'aéronautique ou l'industrie chimique afin d'identifier et analyser les risques. Cela a mené à s'interroger sur le type de méthodes à transférer au domaine du bâtiment au regard de la complexité inhérente à celui-ci, puis à faire des choix en conséquences qui sont présentés dans ce manuscrit. Puisque le choix s'est orienté sur le recueil de jugements d'experts comme source d'information, une réflexion a été menée afin de déterminer comment fiabiliser ces jugements d'experts. Enfin, une expérimentation a permis d'éprouver la méthode développée afin d'en déterminer des avantages, des limites, des améliorations, des apprentissages et des perspectives.

Ainsi, une méthode d'identification et d'analyse des aléas et risques associés appliquée au bâtiment a été développée. Celle-ci a pour but de mesurer l'influence qu'un composant de construction aura sur la performance globale du bâtiment dans lequel il est intégré et ce sur tout son cycle de vie. Cette méthode se base sur la capitalisation de l'expérience des différents acteurs intervenant dans un projet de construction (fabricant, artisan, maître d'ouvrage, gestionnaire...).

Cette méthode se décompose en trois processus. Le premier est préliminaire et permet d'une part d'établir une famille d'indicateur de performance représentant les objectifs de performance à atteindre pour un bâtiment et d'autre part de déterminer le processus à suivre ensuite. Le second concerne les composants largement diffusés dont un retour d'expériences est déjà disponible et le dernier concerne les composants innovants pour lesquels pas ou très peu de retour d'expériences est disponible.

Ces travaux de recherche conduisent dès lors à créer pour chaque composant étudié une base de données, qui pourrait être reliée à des outils d'aide à la décision ou même au BIM (Building Information Model) via la formalisation de règles associées à chaque couple 'aléa/risque'. Cela permet également d'identifier pour chaque composant un profil 'aléa/impact'. Par ailleurs, dans le cas où plusieurs composants d'une même catégorie ont été étudiés, une aide à la décision pour le choix du composant le plus adapté à un projet au regard des objectifs de performance souhaités pour ce projet pourrait être proposée. Enfin, cela peut permettre d'anticiper les aléas et prévenir les conséquences associées, au regard des objectifs de performance souhaités pour un projet de construction mais également au regard des conditions d'assurance retenues.

Ce manuscrit de thèse de doctorat présente dans une première partie l'état de l'art du risque dans la construction. Dans une deuxième partie, la méthode est présentée et sera discutée lors d'une troisième partie proposant également des perspectives à cette méthode.

PARTIE 1 : LE RISQUE ET LA CONSTRUCTION

« L'un des défis les plus difficiles à relever sera de modifier nos modes de pensée de façon à faire face à la complexité grandissante, à la rapidité des changements et à l'imprévisible, qui caractérisent notre monde. Nous devons repenser la façon d'organiser la connaissance. Pour cela, nous devons abattre les barrières traditionnelles entre les disciplines et concevoir comment relier ce qui a été jusqu'ici séparé. »

Federico Mayor

(Lorsqu'il était directeur général de l'UNESCO, dans la préface de 'Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur' d'Edgar Morin, 1999)

Le cycle de vie d'un bâtiment, allant de la naissance d'un projet de construction, en passant par sa mise en œuvre et en service jusqu'à son exploitation, et sa déconstruction ou réhabilitation est empreint de complexité et d'incertitude encore mal appréhendées et non prises en compte. Aussi, comprendre la place du risque dans ce domaine, comment l'appréhender et proposer des solutions est primordial pour qui veut améliorer aussi bien les processus existants que le bâti lui-même et les composants de construction dans une optique d'espérer un jour pouvoir garantir les performances globales (énergétique, environnementale, économique et sociale) attendues.

Cette première partie permet d'introduire ce travail de thèse en présentant le contexte et en positionnant la recherche, pour ensuite présenter les concepts clefs permettant de répondre à la problématique. Dans un premier temps l'appréciation du risque est définie puis dans un second temps la combinaison des jugements d'experts de manière 'scientifique' afin d'assurer une certaine fiabilité aux données recueillies est présentée.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE

Dans ce chapitre, un état de l'art du risque dans la construction est dans un premier temps proposé, puis dans un second temps est expliqué l'importance de prendre en compte à la fois la complexité et l'incertitude inhérente au domaine du bâtiment pour finalement dans un dernier temps présenter le contexte et la problématique de cette thèse de doctorat.

I. État de l'art du risque dans la construction

Les questions liées au risque dans la construction, ainsi que le management du risque dans ce domaine sont assez récents, notamment en France [Khartabil, 2013].

Al-Bahar et al. [Al-Bahar, 1990] constatent que le concept de management du risque est relativement récent dans le domaine de la construction et introduisent un nouvel outil formel, logique et systématique pour les entrepreneurs de la construction afin d'identifier le risque, d'en faire une analyse probabiliste, d'évaluer les risques significatifs et de développer plusieurs alternatives de stratégie de management du risque pour un projet de construction. Cet outil est intitulé Construction Risk Management System (CRMS). Il offre la possibilité d'être utilisé à différents degrés. Les petits entrepreneurs peuvent obtenir une meilleure visualisation du risque total et utiliser les résultats pour savoir si oui ou non le projet vaut le coup de proposer une offre. Quant aux gros entrepreneurs, l'outil peut leur permettre d'intégrer le management du risque tout au long du management du projet de construction. Les recherches se poursuivent afin d'avoir une meilleure compréhension du risque auquel les entrepreneurs font face quotidiennement.

En 1997, Akintoye et al. [Akintoye, 1997] décrivent, suite à une enquête auprès d'entrepreneurs et de groupes de gestions de projet de construction, la perception du risque dans le secteur de la construction au Royaume-Uni. Cette enquête permet de conclure que le management du risque est essentiel au domaine de la construction permettant de minimiser les pertes et d'améliorer la rentabilité. Il est également constaté que le secteur de la construction a en majorité une aversion au risque. En outre la perception du risque en construction est généralement associée à des aléas, des événements qui influencent les objectifs de coûts, de délais et de qualité. Ainsi les analyses de risques et les techniques de management des risques sont rarement utilisées dans le domaine par manque de connaissance d'une part et par scepticisme vis-à-vis de l'adaptabilité de ces techniques au secteur de la construction.

En 2000, Lair [Lair, 2000] propose une méthode d'évaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment. Dans un premier temps une méthode d'analyse de données permet de collecter, organiser et évaluer la qualité des données pour avoir une meilleure représentation du comportement du système, à la fois multi-échelle et multi-modèle pour ensuite déterminer une durée de vie dite « consensuelle ». Cette procédure est couplée à une Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), une « procédure systématique, formelle, d'analyse d'un système pour identifier les modes de défaillance[1] potentiels, leurs

[1] « Cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ». [AFNOR, 2006], représentant donc la menace que le système n'atteigne pas son objectif, autrement dit c'est un risque considéré par sa seule dimension négative.

causes et les effets sur l'aptitude à la fonction du système » [AFNOR, 2006]. L'AMDE a été adaptée à la construction par Lair et se décompose, pour la phase de mise en œuvre du système, par une AMDE processus ; puis pour la phase de vie en œuvre, par une AMDE produit. Cela permet de structurer les informations relatives à la durée de vie d'un produit (description structurelle et fonctionnelle du produit) pour lequel il n'y a pas de retour d'expériences. Cependant cette approche ne permet pas d'estimer directement la durée de vie d'un produit.

Mills [Mills, 2001] mentionne le fait que les projets de construction sont toujours associés à un haut degré d'incertitude qui nécessite de prendre plusieurs hypothèses quant au futur. D'où l'intérêt d'opter pour un management du risque systématique aux prémices du projet, afin de connaître les sources de risques et les conséquences potentielles. En outre, cela permet de choisir les hypothèses qui seront les plus favorables à la réussite du projet, proposer des actions pour maîtriser les risques au mieux et d'apprécier le bénéfice financier lié à ces actions. Cela permet aussi, selon lui, de clarifier les objectifs du projet et ainsi de définir au mieux le projet.

Vrouwenvelder et al. [Vrouwenvelder, 2001] présentent un état de l'art de l'appréciation du risque et de la communication du risque dans le génie civil. Par cette étude, ils montrent la nécessité de définir de manière commune quel risque est jugé acceptable ou non dans le génie civil au regard de la société entière. Ainsi pour eux, la question fondamentale est la suivante : « How much safety does society really need and what is it prepared to pay for that level or for a higher level is it insists? ». Ainsi, ils traitent dans ce document à la fois de l'évaluation des risques et du processus de prise des décisions.

En 2006, Talon [Talon, 2006], propose une méthodologie permettant d'évaluer des scénarii de dégradation de produits de la construction. Cette méthodologie se découpe en quatre étapes. Une analyse qualitative permet de déterminer sur une base fonctionnelle les scénarii de dégradation d'un produit (basée sur l'AMDE adaptée à la construction par Lair [Lair, 2000]). Puis, une analyse quantitative temporelle conduit à évaluer les durées de vie et les probabilités d'apparition des scénarii et leurs interactions. Une analyse quantitative de la criticité[2] permet ensuite de classer puis hiérarchiser les scénarii. Finalement, une analyse quantitative des performances permet d'obtenir des profils multi-performances à différents moments de la vie en œuvre de tout produit de construction intégré au bâti. Cette méthodologie permet d'obtenir la liste des scénarii de dégradation d'un produit intégré à un projet. Par ailleurs, elle donne accès à la durée de vie d'un matériau au regard d'un phénomène de dégradation ou celle d'un produit au regard d'un scénario ou de l'ensemble des scénarii, ainsi que les probabilités d'apparition du phénomène, du scénario ou de l'ensemble de scénarii. Elle précise également la liste des scénarii classés grâce à la criticité et enfin les profils multi-performances à différents instants de leur vie en œuvre. En outre, selon Talon, cette méthodologie permet d'offrir les perspectives suivantes : « un potentiel majeur pour l'implémentation en conception, l'implémentation en inspection, maintenance et réparation et la valorisation industrielle, telles

[2] Agrégation de la durée, de la probabilité et de la gravité – basé sur le C d'une AMDEC pour Criticité, l'AMDEC étant une extension de l'AMDE incluant une estimation de la criticité des défaillances permettant de les hiérarchiser

que l'aide à l'évaluation des produits de construction (avis techniques, certification), l'apport d'une méthodologie d'évaluation de la durée de vie […], la capitalisation des informations expertes et l'aide à l'élaboration d'expérimentations. ». Bien que la méthodologie proposée prenne en compte plusieurs étapes du cycle de vie du bâtiment, elle ne permet pas de connaitre l'influence du composant étudié au regard d'un ensemble d'objectifs de performances choisis pour le bâtiment représentant sa performance globale. Elle est, de plus, coûteuse en temps de réalisation, fastidieuse, et les résultats ne sont pas réutilisables d'une étude à l'autre [Hans, 2007].

En 2011, Bazzana [Bazzana, 2011] propose un prototype d'outil fonctionnel. Cet outil s'appuie sur ses travaux de définition d'un cadre de modélisation générique pour les produits du bâtiment afin de contribuer à la maitrise de la qualité des produits. Cela est possible grâce à une analyse de risques qui permet l'identification des modes de défaillances potentiels des produits. L'outil permet de faciliter la conduite de l'étude par un agent en totale autonomie, de diminuer le temps nécessaire à l'obtention de résultats. Il permet également le partage de connaissances des produits et de leurs modes de défaillances et finalement il est applicable à l'ensemble des familles de produits du bâtiment pour un mode de fonctionnement identique donné. Cependant, cet outil ne permet pas de connaitre l'influence des produits et des modes de défaillances sur les différents indicateurs de performances représentant la performance globale du bâtiment.

En 2011, Herlin et al. [Herlin, 2011] proposent une démarche de représentation des risques « laissant entrevoir une possibilité de gestion plus intégrée, où les conséquences des événements risqués sont quantifiées ». Cette démarche s'appuie sur la combinaison de trois approches : temporelle, structurelle et fonctionnelle, afin de prendre en compte le caractère évolutif et multi-échelle des projets de construction. Ces trois approches constituent un point de départ pour une panoplie d'outils permettant de traiter les différentes étapes de la maîtrise des risques de projet.

En 2009, le projet GERMA, un projet de recherche d'une durée de trois ans de l'Agence Nationale de la Recherche, MAITRISE et GESTION des RISQUES liés au MANAGEMENT des PROJETS COMPLEXES de GENIE CIVIL) et qui a fait l'objet en 2012 d'un cahier du Moniteur, s'intéresse au management des risques dans le secteur du BTP. « Partant du constat que dans le bâtiment, les travaux publics et l'aménagement urbain les projets deviennent de plus en plus complexes en raison des techniques et de la diversité des intervenants impliqués, une méthodologie pour limiter les risques s'avère nécessaire. » [GERMA, 2012]. Ce projet avait pour objectif de permettre aux acteurs de la construction en charge de la conduite des projets de « mieux comprendre et intégrer les risques associés à leur projet, de s'interroger sur la manière de les anticiper, de les analyser voire de mieux les modéliser, pour les gérer. » en abordant le management du risque de manière globale et concrète à toutes les étapes d'un projet, de la décision à la mise en service du bâtiment.

Une méthodologie d'appréciation du risque probabiliste appliquée aux développements biologiques sur les ETICS (External Thermal Insulation Composite System) a été proposée en 2013, par Ramos et al. [Ramos, 2013]. Cette méthodologie a permis d'identifier les mécanismes responsables des dégradations des ETICS grâce à un arbre de défaillances. Un

méta-modèle permet également de réduire le temps de calcul des simulations Monte Carlo qui comparent les différents scénarii afin d'identifier les façades offrant le moins de risques.

Khartabil et al. [Khartabil, 2013] rappellent que l'implication de la communauté Française sur les questions de la gestion du risque des projets de construction est récente et qu'il est nécessaire de développer des « outils plus efficaces pour la maîtrise des risques dans les projets de construction ». Aussi, ils ont développé une méthodologie pour concevoir et implémenter une base de connaissance générique pour les risques liés aux projets de construction par domaine (bâtiment, tunnel, autoroute, …). Ils souhaitent associer à ces bases de connaissance générique, des bases de données spécifiques (caractéristiques) pour chaque projet. Ces bases de connaissance générique et de données spécifiques permettront via un logiciel d'apprécier le risque sur le cycle de vie de chaque projet et de suivre les actions associées. L'ensemble des connaissances acquises à chaque nouveau projet sera ensuite implémenté dans la base de connaissance générique.

« Une représentation multi-échelle (permettant de passer d'une vision fine à une vision macroscopique) et multi-facette du projet [de construction] » [Rodney, 2014] est proposée par Rodney et al. en 2014, partant du principe qu'un projet de construction est un processus unique avec des points de vue multiples dépendants des parties prenantes et de leurs considérations propres au regard du projet et ce afin « de maîtriser la complexité et d'anticiper les comportements à adopter et les actions à réaliser. ». Ils privilégient une vision systémique, afin de prendre en compte l'incertitude et la complexité et d'intégrer la gestion des risques à la gestion du projet. Ainsi, selon Rodney et al., il est nécessaire de proposer une modélisation unique du projet et des risques, afin de permettre d'une part d'intégrer les phénomènes d'interaction entre risques (via une approche itérative) ; d'autre part, de déterminer les actions à mettre en place pour traiter les risques (via l'association des risques aux composantes du projet).

Dans leur revue sur l'application des méthodes de décision multi-critères dans la construction, Jato-Espino et al. [Jato-Espino, 2014] recensent plusieurs articles (publiés entre 2006 et 2012, à l'exception d'un en 1998) concernant l'utilisation de différentes méthodes de décision multi-critères prenant en compte ; soit l'incertitude et le risque affectant un projet de construction, soit l'attitude face au risque du décideur, afin d'affiner l'aide au choix de la décision à prendre.

Shahriari et al. [Shahriari, 2015] remarquent que le manque de communication entre les différentes parties prenantes, notamment entre les différentes phases du cycle de vie, ainsi que la perte d'informations engendrent une discontinuité sur la phase d'analyse du risque. De plus, ils pointent du doigt le fait qu'il n'y a pas de culture du risque et de son appréciation dans le domaine du bâtiment. Cependant, ils constatent que l'incertitude, malgré un côté négatif qui engendre des pertes, a un côté positif, qui permet d'apporter de la flexibilité dans la gestion des projets de construction.

Taillandier et al. [Taillandier, 2015a & 2015b] ont développé SMACC (Stochastic Multi-agent simulAtion for Construction projeCt), un outil simulant un projet de construction tout en considérant les risques. Il permet d'évaluer les risques et leurs conséquences associées pour chaque acteur du projet et d'aider à la décision grâce à des indicateurs. Cet outil est basé sur l'approche 'Agent', ce sont des entités autonomes, ayant leur propre vision du système,

capacité de décision et d'action. Ces entités ont un comportement qui répond à des règles simples et sont définies localement. Les agents sont capables d'interagir avec les autres agents et d'évoluer dans un système complexe et dynamique. Cette simulation à base d'agents est couplée avec une approche stochastique. Les auteurs précisent que le modèle proposé, bien que la version 2 permette déjà de modéliser un projet de construction réel de manière assez efficace, présente des limites, telle que la non possibilité « de se placer à différents niveaux de description du projet ou des risques ».

Sourani et al. [Sourani, 2015] utilisent la méthode Delphi, c'est une méthode d'auto-évaluation, une procédure systématique permettant d'atteindre un consensus fiable de jugements issus d'un panel d'experts via une itération de questionnaires (chaque questionnaire valide les découvertes dues au questionnaire précédent). Ils remarquent que bien que cette méthode soit utilisée dans plusieurs domaines et pour différents buts, elle est cependant peu utilisée dans celui de la recherche en management de la construction. Ils ajoutent que la méthode Delphi permet une analyse quantitative mais n'offre pas la possibilité de tests statistiques avancés. Leur cas d'étude a permis de mettre en exergue le fait que les experts doivent être sélectionnés au regard de leurs connaissances, de leur volonté à contribuer et de leur disponibilité. De plus le panel d'experts doit être représentatif des expériences et métiers de la construction, afin de réduire les biais communs aux experts de ce domaine. Cependant ils constatent que cette méthode nécessite une implication en temps importante pour les experts puisqu'ils doivent répondre à plusieurs questionnaires, alors que ce sont généralement des personnes occupées, ce qui augmente le risque d'abandon au cours de l'étude, nécessitant de recruter suffisamment d'experts dès le départ.

Bien que certaines méthodes ou outils aient été développés, Zou et al. [Zou, 2015] constatent que l'un des défis du management du risque dans la construction est de récolter l'information nécessaire auprès des différentes parties prenantes, et ce de manière adéquate, au risque d'être « médiocre, incomplète et incohérente ». Ils proposent par conséquent d'intégrer la méthodologie du management de la connaissance (Knowledge Management) dans le 'Building Information Modeling' (BIM, se traduisant par : Modélisation des Informations (ou données) du Bâtiment). Ils ont ainsi développé un système de management intégrant le management de la connaissance au BIM (BIM and Knowledge based Risk Management System – BKRMS) afin de pouvoir être compatible avec le management du risque tout au long du cycle de vie du projet. Cela permet d'identifier et d'analyser les aléas et de communiquer et les prévenir en amont. Les recherches futures vont se focaliser sur l'implémentation de la base de données risque basée sur la littérature scientifique, la documentation industrielle et les retours d'expériences écrits. Puis ils prévoient de développer une librairie de réflexion/raisonnement basée sur des cas issus du management du risque industriel. Enfin, ils analyseront la base de données et la librairie afin de l'implémenter dans une base de données appropriée permettant d'intégrer le risque dans le BIM pour finalement développer un outil intégré à un logiciel BIM et le tester sur différents cas d'étude.

Le projet recherche ADEME Région Nord Pas de Calais dans le cadre de l'appel à projet : « Lutte contre le changement climatique », Solutions Adaptées pour la Performance Environnementale en Rénovation des Logements Ouvriers, SAPERLO [ADUS, 2011], a pour objectif « d'élaborer et mettre en œuvre un protocole pour contribuer à la généralisation et à

la standardisation des techniques de rénovation en basse consommation appliquées au logement ouvrier. ». Ce protocole se fait sur la base d'un « inventaire des situations positives ou négatives récurrentes », pour « identifier les contraintes et atouts du parc de logements ouvriers » afin d'en « dégager des constantes constructives, techniques, et des constantes comportementales qualifiant ou pénalisant la rénovation BBC en qualité environnementale. » L'idée est d'apporter « une réponse interdisciplinaire, à la fois en termes de valorisation de ce parc immobilier et de satisfaction des occupants. » [ADUS, 2015].

Enfin, le projet Gestion du Retour d'ExpérIence pour la Massification des Opération Intégrées de Rénovation Energétique [TIPEE, s.d.], GRIMOIRE[3], lancé en octobre 2015 pour une durée de deux ans est un des 14 projets lauréats de l'appel à projet ADEME 2014-2015 « Bâtiments responsables à l'horizon 2020 ». « Ce projet vise à démontrer que la formalisation du retour d'expérience chez les maîtres d'ouvrage (MOA) du mouvement HLM permet la massification de la rénovation énergétique. » Via une méthodologie d'aide à la décision innovante et intégrable au fonctionnement des organismes de MOA qui permet la mutualisation des données entre les organismes volontaires, et tout en étant utilisable par l'ensemble des services de manière évolutif et multicritères, il s'agit de « capitaliser des informations tout au long du projet (conception, réalisation, exploitation), sur l'ensemble des thématiques décrivant le concept du développement durable: social, économie, environnement et sur le mode de gouvernance. »

En outre des processus d'évaluation de composants de construction déjà existants sont à mentionner.

La Commission Chargée de Formuler des Avis Techniques, CCFAT, propose une évaluation technique des produits et procédés non traditionnels, afin de limiter les risques de pathologies, via la formulation d'Avis Technique sur « l'aptitude à l'emploi des procédés innovants de construction » [CCFAT, s.d.] par un groupe d'experts, Groupe Spécialisé, GS, représentatifs des professions.

La Commission Prévention Produits mis en œuvre, C2P, au sein de l'Agence Qualité Construction[4], est un outil d'analyse de risques pour les assureurs construction. Elle permet « d'identifier les techniques susceptibles d'engendrer des risques sinistres » et indique une appréciation du niveau de risque (de faible à fort). Sa connaissance des pathologies est issues notamment du Dispositif Alerte [AQC, 2017b] (système de repérage des sinistres sériels, outil de l'AQC, via les experts faisant remonter l'information concernant les sinistres en transmettant leurs rapports à C2P), de Sycodés [AQC, 2017c] (base de données de l'AQC exploitant un échantillon de désordres que les experts construction signalent, ce sont à 80 % des Dommages-Ouvrage, DO) et de l'expertise de ses membres. Ces deux objectifs principaux

[3] Projet pour lequel j'ai contribué dans le cadre de ma thèse

[4] « L'Agence Qualité Construction (AQC) est une association loi 1901, financée par une participation volontaire de ses membres collectée par les assureurs. Elle regroupe toutes les organisations professionnelles de la construction autour d'une même mission : prévenir les désordres dans le bâtiment et améliorer la qualité de la construction. » [AQC, 2017a]

sont d'une part « d'attirer l'attention des professionnels lors de leurs choix techniques sur les produits, et/ou procédés, susceptibles de poser des problèmes », d'autre part « de faire progresser les produits et les textes qui en définissent la mise en œuvre ».

Enfin, l'AQC a également mis en place le dispositif REX Bâtiments performants [AQC, 2017d] depuis 2010, où REX désigne le Retours d'expériences. Ce dispositif permet « une identification précoce des risques émergents, en lien avec la mise en œuvre de produits et procédés innovants, dans le cadre d'une recherche de performance énergétique ou environnementale ». Il s'agit de capitaliser les retours d'expériences via d'une part des audits in situ de bâtiments dit précurseurs et d'autre part des entretiens avec des acteurs ayant contribué aux différentes phases de l'élaboration de ces bâtiments, afin d'identifier les non-qualités impactant les performances prévues et empêchant dès lors d'atteindre les objectifs de performance souhaités initialement tels que la consommation, le confort, la qualité sanitaire par exemple. Via la capitalisation de ces données, des enseignements permettent l'apprentissage par l'erreur et de faire émerger les bonnes pratiques. 750 opérations représentatives sur l'ensemble des typologies de bâtiments à basse consommation et/ou à haute qualité environnementale sont d'ores et déjà recensées sur l'ensemble du territoire métropolitain et les DROM, que ce soit en zones urbaines ou rurales et comptant 45 % d'opérations de rénovation.

Depuis 2011, FINALCAD [Finalcad, 2015], une application mobile a permis d'agréger de nombreuses observations collectées sur le terrain par ses utilisateurs notamment lors des opérations préalables à la réception, OPR, et la garantie de parfait achèvement, GPA. Ces données ont été analysées, triées grâce à des algorithmes auto-évolutifs et ont permis de dresser des tendances concernant la qualité, la productivité et les points de vigilances prioritaires pour « améliorer l'excellence opérationnelle de l'ensemble des acteurs de la filière » permettant ainsi de créer l'Observatoire de la Construction FINALCAD. Son « objectif [est] de publier régulièrement l'état de la qualité de finition de la construction, pour différents types d'ouvrages », afin de permettre aux entreprises, maitres d'œuvre et maitres d'ouvrage, de connaitre le niveau d'exigence du secteur et ainsi de se comparer à la moyenne nationale ; de permettre aux assureurs intéressés d'obtenir « une corrélation entre la qualité de finition et la diminution de la pathologie des désordres relevant de la garantie décennale » ; de permettre aux acteurs publics de connaitre les savoir-faire opérationnels des différents intervenants sur leurs marchés publics et de permettre finalement à l'ensemble de la filière de mettre en place un plan d'action pour l'amélioration des niveaux de qualité grâce à des échanges inter-entreprises.

Enfin, le Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Energétique, PACTE [PACTE, 2015a], a été lancé début 2015 par les pouvoirs publics avec « l'objectif ambitieux d'accompagner la nécessaire montée en compétence des professionnels du bâtiment dans le champ de l'efficacité énergétique, et ce, afin de renforcer la qualité dans la construction et de réduire la sinistralité ». Ce programme s'articule autour de trois axes. Le premier pour « développer, capitaliser et valoriser la connaissance propre à la sinistralité liée à la conception, à la réalisation et à l'exploitation des ouvrages de construction et de rénovation performants sur le plan énergétique et promouvoir la diffusion des solutions techniques les plus efficientes ». Le second pour « Permettre de poursuivre la modernisation

des Règles de l'art de mise en œuvre au regard des exigences d'efficacité énergétique et développer les outils pédagogiques de mise en œuvre et d'autocontrôle pour toutes les tailles de chantiers ». Et enfin le troisième axe pour « renforcer les actions territoriales pour le développement des compétences des professionnels du bâtiment, en lien avec les acteurs régionaux ».

Dans le cadre d'une de ses thématiques concernant les « outils numériques d'aide à la décision de stratégies de rénovation », le programme PACTE apporte un soutien financier au projet création d'un Centre de ressources pour la Réhabilitation responsable du Bâti Ancien, CREBA [PACTE, 2016b], lancé en 2016. Ce projet a pour objectif principal « de proposer un ensemble de ressources en ligne, à l'attention principale de la maîtrise d'œuvre, sur le sujet de la réhabilitation du bâti ancien (<1948) », afin de « permettre d'effectuer des choix « responsables » et de favoriser la qualité des rénovations de cette typologie particulière du parc existant, à la croisée des enjeux énergétiques, techniques et patrimoniaux ». Il s'agit de mettre à disposition des ressources techniques, scientifiques capitalisées en France et en Europe sur le sujet, de développer un outil d'aide à la décision afin d'apporter une approche globale et qualitative lors de la réhabilitation du bâti ancien et enfin de partager les bonnes pratiques grâce aux retours d'expériences sur des réhabilitations de bâti ancien.

Le programme PACTE et l'Union Social pour l'Habitat, USH, ont en outre annoncé le lancement d'un Observatoire de la performance énergétique des bâtiments résidentiels sociaux [PACTE, 2016a] fin 2016, afin « d'analyser à très grande échelle la performance réelle d'immeubles résidentiels récemment livrés ou rénovés ». Il s'agit d'exploiter l'analyse des données recueillies sur l'ensemble du territoire sur 90000 logements neufs et 40000 logements rénovés auprès des bailleurs sociaux pour s'interroger sur la « réalité de la montée en compétences des acteurs de la construction », et sur les « combinaisons optimales de solutions techniques ou de pratiques qui permettent d'atteindre les niveaux de performances recherchés à coûts maitrisés ».

II. De l'intérêt de la prise en compte de la complexité et de l'incertitude

Le bâtiment, non seulement l'objet lui-même mais également toutes les étapes de son cycle de vie, de sa conception à sa déconstruction constituent un système, qui est par essence un système complexe.

En effet d'une part, il y a le projet de construction porté par un ensemble d'acteurs, qui peut être défini comme un processus unique qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maitrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but de construire et d'utiliser un ouvrage conforme aux exigences spécifiques de la construction, incluant les contraintes de délais, de coûts et de ressources et également conforme aux exigences spécifiques des usagers (en terme de sécurité, de confort et d'usage notamment) [Hadji Rezai,

2014][5]. D'autre part, le résultat de ce projet de construction est un bâtiment, qui ne doit pas être vu comme un « objet technique » mais plutôt comme « le support nécessaire pour mener des « activités » », plaçant ainsi « la technique comme une ressource au service d'un usage. » [Gobin, 2003].

Ainsi le système bâtiment, ne peut pas être considéré et défini que par le bâtiment seul. A contrario, le système bâtiment est un système complexe englobant à la fois le projet de construction qui le voit naitre, ainsi que le bâtiment en lui-même, les composants de construction qui le constituent et toutes les étapes de son cycle de vie (conception du bâtiment, fabrication des composants de construction, transport, stockage des composants de construction, mise en œuvre du bâtiment, mise en service du bâtiment, exploitation du bâtiment, dépose du bâtiment). Et ce système est un système complexe :

- De par ses multiples-échelles, aussi bien dimensionnelle – de l'échelle du matériau (voire de l'atome si on étudie les caractéristiques du matériau) à celle du bâtiment ; que temporelles – les différentes étapes d'un projet de construction sont de durées différentes, toujours liées, pouvant se chevaucher, voire s'entrecroiser ;

- De par la multitude de parties prenantes. Ces parties prenantes ont d'une part des objectifs et des points de vue souvent différents, parfois opposés. D'autre part, elles travaillent parfois sans contact entre elles, parfois en interaction plus ou moins directe les unes avec les autres et ce de manière plus ou moins simple et évidente ;

- De par sa dimension transverse, puisqu'il regroupe un ensemble de disciplines différentes qui dans l'idéal doivent être liées, interconnectées et non pas prises indépendamment au risque de créer des problématiques conceptuelles, techniques pas toujours solvables.

Ainsi le risque est alors de vouloir trop simplifier la gestion du bâtiment tout au long de son cycle de vie et de perdre l'objectif principal auquel il doit répondre. A cet effet, Gobin (2003) pointe un principe important, également valable pour un bâtiment, en rappelant l'axiome suivant de l'analyse fonctionnelle : « Tout objet ne se justifie que par le service qu'il rend à un utilisateur en lui permettant d'agir sur son environnement pour répondre à un besoin. » En effet, à quel besoin doit répondre le bâtiment ? Quelle est sa destination et surtout ses utilisations ? « Un bâtiment ne peut pas se contenter d'être conforme aux critères d'une catégorie mais que chacune de ses utilisations est fortement corrélée à la spécificité de ses usagers, c'est-à-dire que chaque opération doit être engagée dans la perspective d'un client ciblé » [Gobin, 2003]. Ainsi « dans le cadre de chacune de ses activités, l'utilisateur attend d'un bâtiment qu'il lui offre les meilleures conditions pour la mener à bien » (ibid.).

[5] « A building project is a unique process that consists of a set of coordinated and mastered activities, with starting dates and deadlines, undertaken in order to construct a building in compliance with the specific construction requirements including the ones of time, cost and resources but also with the specific requirements of users, especially in terms of comfort, function and use. »

Alors comment comprendre ce système complexe, afin de mieux l'appréhender et l'optimiser afin de s'assurer que le bâtiment atteigne les objectifs de performances souhaités à la conception de celui-ci tout en répondant aux besoins des utilisateurs ?

« Construction is one of the most risky projects which is associated with high degree of uncertainty and risk due to the nature of its business activities, processes, and the external environment. Late completion of projects, surpassing their estimated budgets and in some worse instances not even achieving the desired quality and operational requirements, due to uncertainties, has given a bad reputation to this sector. » Shahriari (2015) exprime le fait que l'incertitude et le risque dans le domaine de la construction sont inhérents à la complexité de ce domaine.

Et puisque « la complexité surgit comme difficulté, comme incertitude et non pas comme clarté et comme réponse. » alors le problème est « de savoir s'il y a une possibilité de répondre au défi de l'incertitude et de la difficulté. » [Morin, 1988]. Aujourd'hui, la connaissance scientifique, qu'elle soit exacte ou humaine et sociale est indissociable de la prise en compte de « l'incertitude, le désordre, la contradiction, la pluralité, la complication, etc.» (Ibid.).

En outre, Edgar Morin [Morin, 1988] rappelle que l'objet complexe est d'une part une unité, d'autre part un système constitué de plusieurs éléments différents, autrement dit le système bâtiment constituent « une unité en même temps qu'une multiplicité ». Le piège serait de « dissoudre le multiple dans l'un » et « l'un dans le multiple » alors qu'un « système est en même temps plus et moins que ce que l'on pourrait appeler la somme des parties ».

Un système est moins que la somme des parties, parce que l'ensemble va inhiber certaines potentialités de chaque partie. Cependant il est plus que la somme des parties, puisque le tout organisé fait émerger des qualités qui existent grâce à l'ensemble de ces parties. Aussi il est important de s'intéresser aux différentes parties qui constituent ce système complexe, afin de mieux le comprendre dans son ensemble. Comprendre de quelle manière un élément du tout va impacter l'ensemble et pourquoi. Ainsi comprendre comment un composant de construction va impacter l'ouvrage permettra de mieux comprendre par la suite l'ouvrage dans son ensemble.

Ce système est en outre soumis à des aléas, à l'incertitude. Incertitude qu'il faut essayer de prendre en compte au mieux et accepter pour avoir une vision non erronée de ce système. Système constitué de différents processus (conception, mise en œuvre ou encore exploitation du bâtiment) et dont les objectifs, les critères de performances, les domaines d'études (sciences exactes, sociales et humaines), les parties prenantes, les échelles dimensionnelles (bâtiments, procédés, produits, …) et les échelles temporelles associées seront différentes. Outre les interactions au sein de chacun de ces processus, ces derniers pourront interagir entre eux. A ces interactions propres au système, s'ajoutent des interactions avec le milieu extérieur qu'il faudra également prendre en compte.

Ainsi, lorsque Schrödinger nous dit : « Cependant nous avons de plus en plus conscience que la spécialisation n'est pas une vertu mais un mal inévitable, qu'une recherche spécialisée n'a de valeur réelle que dans le contexte de la totalité intégrée du savoir. » [Schrödinger, 1992], il explicite un point important : l'intérêt de prendre du recul, de voir dans la globalité et ce dès

lors qu'il y a complexité, afin de lier et faire interpénétrer les différents domaines d'un même ensemble entre eux.

Or, le système bâtiment porte en son sein cette transversalité, de par son caractère interdisciplinaire. De par sa pluridisciplinarité à plusieurs niveaux, ce système et ses composantes, plus que jamais, nécessitent d'être étudiés d'un point vue transversal. Aussi, afin d'innover dans la manière d'étudier le système bâtiment et ses composantes, de les comprendre sous un nouvel angle, un nouveau point de vue, il est essentiel de sortir de son domaine, de prendre du recul et d'aller explorer ce qui se fait ailleurs. En effet, puisque telle que le rappelle Morin (2005), la transdisciplinarité va permettre « à la fois de concevoir l'unité de la science et la différenciation des sciences ». Permettant alors de se nourrir des avancées d'autres domaines pour faire avancer son propre domaine.

Enfin, « les sciences sont constamment confrontées aux incertitudes » [Dayan, 2014]. Et de fait, l'incertitude peut se manifester sous différentes formes et être définie de différentes manières (*cf.* Annexe A). Aussi ce n'est pas possible de composer sans prendre en compte l'incertitude, puisque dès lors qu'un système est complexe, l'incertitude est présente et ne peut être négligée. Aussi comment appréhender l'incertitude ?

Les experts permettent d'estimer et de prédire en situation incertaine et lorsque peu d'information est disponible. Or dans le domaine de la construction, il existe encore peu de recensement d'informations, de bases de données systématiques permettant d'exploiter des modèles statistiques. Aussi un moyen d'obtenir de l'information exploitable est de recourir au retour d'expériences, aux jugements d'experts. Ces experts sont généralement définis par leurs qualifications et expériences, mais aussi par leur statut parmi leurs pairs [Burgman, 2016] (*cf.* PARTIE 1 : CHAPITRE 1). En outre, il y existe une différence peu appréciable, dans un grand nombre d'expériences, entre les personnes qui sont considérées comme expertes et celles non officiellement qualifiées ou expérimentées. En effet, une fois que ces personnes, non officiellement qualifiées ou expérimentées, ont été confrontées à la situation, ont compris et assimilé les données, le jargon et le contexte, leurs estimations peuvent être aussi bonnes que celles des personnes considérées comme expertes.

Et bien que le fait d'accumuler des données permette de tendre vers une probabilité objective, il faut garder à l'esprit [Burgman, 2016] d'une part que les experts ne sont pas aussi bons à estimer des jugements que ce qu'ils pensent ou que ce que nous pourrions croire. D'autre part, un grand nombre d'éléments d'incertitude existent lors d'estimation d'experts. Leurs estimations sont donc empreintes d'incertitudes mais elles doivent coïncider avec les données quand celles-ci sont disponibles.

Aussi, dans le cadre de cette thèse de doctorat, pour comprendre comment l'intégration d'un composant influence le bâtiment et sa performance globale, il est important de prendre en compte les aléas (engendrant des risques qui peuvent être préjudiciables pour le système) et l'incertitude à laquelle est soumis le système et notamment le sous-système 'composant de construction intégré'.

III. Contexte et problématique

Alors qu'évaluer les performances intrinsèques des composants de construction est évident et systématique, l'influence du composant une fois intégré au bâtiment sur la performance globale du bâtiment (énergétique, environnementale, économique et sociale) demeure peu questionnée.

En effet Shahriari et al. constatent qu'il y a un manque de culture du risque et de son appréciation dans le domaine du bâtiment. Aussi plusieurs méthodes, outils ou méthodologies se proposent de tenir compte du risque dans ce domaine.

Les méthodes proposées pour appréhender le risque dans la construction sont soit des méthodes permettant d'identifier et analyser les risques, soit d'évaluer les risques sur un projet de construction [Herlin, 2011], [GERMA, 2012], [Khartabil, 2013], allant jusqu'au management des risques [Mills, 2001], [Taillandier, 2015a & 2015b], parfois même intégrées au BIM [Zou, 2015]. Certains s'intéressent à la prise de décisions dans l'incertitude et le risque (Multiples références dans [Jato-Espino, 2014]) ; et d'autres, toujours dans un contexte de prise de décisions, s'intéressent à l'attitude face au risque du décideur (Multiples références dans [Jato-Espino, 2014]). Tandis que certains proposent une méthodologie d'appréciation du risque probabiliste appliquée à un procédé, sur un type de risque en particulier [Ramos, 2013], d'autres proposent un management plus global, multi-échelles (vision fine à macroscopique) et multi-facettes afin de prendre en compte l'incertitude et la complexité d'un projet de construction [Rodney, 2014].

En outre, ces dernières années, de plus en plus de recueil de données, via des observatoires ou via la création de bases de données font émerger le fait que la filière de la construction montre un intérêt grandissant pour le recueil et l'exploitation du retour d'expériences dans une optique d'amélioration continue aussi bien des composants que des processus de construction.

Enfin, depuis 2000 [Lair, 2000], [Talon, 2006], [Bazzana, 2011], l'analyse du risque pour un procédé (système ou produit) intégré dans un ouvrage est expérimentée au sein du CSTB. Cependant les trois propositions issues de ces expérimentations n'ont pas été développées plus avant et sont restées au stade de recherche.

Ces trois travaux de recherche ont certaines limites, notamment de par l'usage de l'AMDEC, qui bien qu'elle « permette de générer une base d'information puissante pour définir, améliorer, corriger et valider une conception, un procédé ou un moyen, tout au long de la vie du produit, depuis la conception jusqu'à sa fin de vie » [Talon, 2006], nécessite une très bonne connaissance structurelle et fonctionnelle du procédé étudié, et est assez conséquente en termes de temps investi. De plus, la complexité liée au domaine de la construction, de par le caractère très déterministe de l'AMDEC, est très difficile à étudier. En outre, ces travaux ne concernent pas là encore directement l'estimation de l'influence de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale du bâtiment et ce sur l'ensemble de son cycle de vie.

En effet, il est important de trouver un moyen de systématiser la manière d'estimer l'influence de ce composant intégré au bâtiment (un élément du tout) au regard de la performance globale de ce dernier (le tout). Cela permet de prendre en compte l'ensemble des objectifs de performances constituant la performance globale tout en mettant en exergue la menace et surtout l'opportunité associées au composant étudié, et ce afin de minimiser le risque de dégrader un ou plusieurs indicateur(s) de la performance globale alors que le composant a été choisi pour améliorer un ou d'autre(s) indicateur(s) de la performance globale. Finalement, cela permet de voir comment un composant va agir sur le tout et impacter la performance globale de l'ouvrage, autrement dit de passer de l'échelle du composant à l'échelle du bâtiment.

En outre, dès lors qu'un nouveau composant apparaît sur le marché, n'ayant pas ou peu de retour d'expériences sur celui-ci, il devient essentiel de rendre systématique l'évaluation de la prise de risque associée à l'intégration de ce composant dès les premières utilisations. De cette manière, il est possible de détecter des couples 'aléa/risque' préjudiciables pour la performance globale et ainsi d'améliorer le composant en question.

La connaissance des couples 'aléa/risque' pour différents composants d'une même catégorie (isolation par exemple) permet également d'ajuster le choix du composant de construction à intégrer dans le bâtiment au regard des objectifs de performance choisis pour le bâtiment. Cela permet à terme d'optimiser l'atteinte de la performance globale souhaitée pour le bâtiment en question.

C'est dans ce contexte qu'est née cette thèse. Elle a pour objectif d'**évaluer l'impact de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie**. Autrement dit, d'évaluer comment l'intégration d'un composant de construction va permettre ou non au bâtiment d'atteindre et maintenir sa performance globale tout au long de sa vie.

Dès lors, les questions qui se posent sont les suivantes :

- Comment prendre en compte la complexité du composant de construction, et de l'ouvrage dans lequel il est intégré, ainsi que la complexité inhérente au domaine de la construction ?

- Comment estimer la prise de risque liée à l'intégration d'un composant de construction destiné à améliorer une ou plusieurs performances du bâtiment dans lequel il est intégré et ce au non-détriment des autres performances ?

- Comment prendre en compte et estimer l'incertitude ? Comment la définir ?

- Comment récolter l'information permettant d'estimer l'influence de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie ?

Finalement la question principale peut-être posée en ces termes :

– Comment et par quel moyen l'influence de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale d'un ouvrage tout au long de son cycle de vie peut-elle être évaluée ?

Autant de questions auxquelles ce manuscrit de thèse de doctorat va chercher à répondre.

Dans un premier temps, il est nécessaire de fixer le cadre de la thèse et les directions prises pour répondre à cette problématique.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps présenté un état de l'art de la construction mettant en exergue que le domaine du bâtiment manque de culture du risque bien que plusieurs méthodes, outils, processus proposent d'appréhender et de prendre en compte le risque dans ce domaine. Cependant nous avons montré qu'il est nécessaire de s'intéresser à la prise de risque liée à l'intégration d'un composant de construction dans un bâtiment puisque chaque composant de construction intégré pour améliorer une ou plusieurs performances du bâtiment peut en dégrader une ou plusieurs autres et ainsi dégrader dans son ensemble la performance dite globale du bâtiment. Et afin de répondre à cette problématique nous avons montré qu'il était important de prendre le problème en considérant le fait que la complexité et l'incertitude nécessitent d'être prises en compte tout en ayant une approche transversale, transdisciplinaire et systémique afin d'exploiter le retour d'expériences et ce avec précaution. Enfin nous avons présenté le contexte de ces travaux de recherche.

Dans le chapitre suivant, nous définissons les concepts du risque, ainsi que l'appréciation du risque qui constitue la démarche opérationnelle du management du risque et qui permet d'identifier, analyser et évaluer le risque.

CHAPITRE 2 : APPRECIER LE RISQUE

« Tout ce qui comporte chance comporte risque, et la pensée doit reconnaître les chances des risques comme les risques des chances. »

Edgar Morin

(*Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*, p.101 [Morin, 1999]

Avant d'apporter une réponse à la problématique présentée au chapitre précédant, il est dans un premier temps essentiel de définir le risque et de présenter les manières de l'appréhender et de l'estimer.

Aussi ce chapitre propose d'abords de définir les concepts pour ensuite présenter l'appréciation du risque qui est « le processus global d'identification, d'analyse et d'évaluation du risque » [AFNOR, 2010], pour finalement exposer les choix faits pour répondre à la problématique.

I. Définir les concepts

Selon Le Ray (2012), la problématique du risque est « une problématique de la vie quotidienne […], de chaque instant […], toujours complexe ». En effet, le risque peut survenir à chaque instant et avoir un impact négatif comme positif, dépendant de la situation dans laquelle il intervient, avec les complexités propres au système et aux individus concernés. Chaque personne réagit d'une manière qui lui est propre face aux risques auxquels elle est confrontée. Dès lors, la perception du risque est personnelle et il est primordial de définir un certain nombre de concepts clefs avant toute évaluation ou gestion du risque dans une optique commune.

En outre, manager le risque n'est pas seulement destiné à éviter des drames humains et/ou environnementaux mais est également un moyen d'améliorer les performances d'un système, d'une organisation ou d'un produit en conception ou déjà existant, de faire émerger des opportunités qui ne sont pas évidentes.

I.1. Aléa

L'aléa constitue un « hasard favorable ou défavorable »[6] pour une cible visée. Si le hasard est favorable, il sera vu comme une opportunité pour le système, a contrario s'il est défavorable, il sera considéré comme une menace. Un événement, positif ou négatif, peut alors se produire et impacter les objectifs de la cible.

Cependant une opportunité ou une menace, aussi imminente soit-elle, n'est pas réelle tant que l'événement redouté ne s'est pas produit. Par conséquent, l'opportunité peut être acceptée et la menace contrée.

I.2. Risque

Le risque survient lors de la présence simultanée et non prévue d'un aléa et d'une cible, créant une zone à risque(s) (*cf.* Figure 1) [Le Ray, 2012].

[6] Définition de 'aléa' tiré de TFLi, Trésor de la langue française informatisé

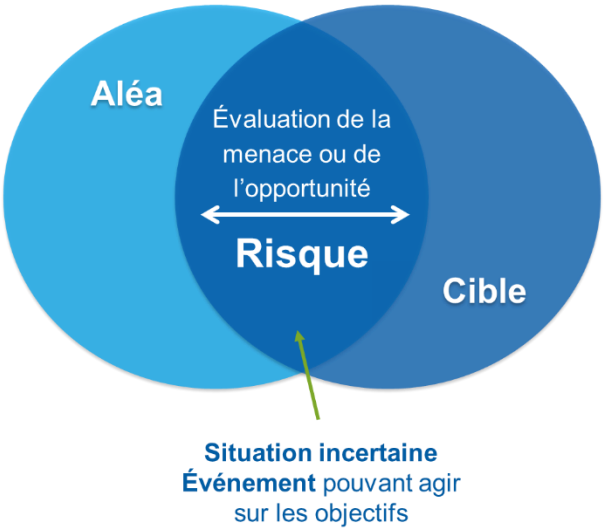


Figure 1 : Modélisation du risque inspirée de celle de Le Ray [Le Ray, 2012]

Ainsi l'ISO Guide 73:2009 [AFNOR, 2010] définit le risque en ces termes : « effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs ». Aucun jugement de valeur n'est émis sur l'effet que peut avoir un risque. Effectivement, « un effet est un écart, positif et/ou négatif, par rapport à une attente ». Le risque peut donc être positif ou négatif et relève d'un manque d'information sur une situation donnée.

Pour compléter cette définition, regardons les principales définitions du risque, regroupées par Talon (2006) dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Définitions du risque issues des normes françaises, européennes, internationale et d'ouvrages relatifs à l'analyse des risques [Talon, 2006]

n°	Source	Définition
1	NF 71-011 [HAD, 97]	Le risque est la probabilité d'occurrence d'une défaillance associée à l'importance des conséquences de celle-ci.
2	PrEN 50129 [HAD, 97]	Le risque est la combinaison de la fréquence (ou probabilité) d'un accident et des conséquences de l'accident.
3	RE.Aéro 701 10 [HAD, 97]	Le risque est la grandeur à deux dimensions associée à une circonstance de la vie du système et caractérisant un événement redouté par sa probabilité d'apparition et le montant de la perte consécutive (gravité), exprimés qualitativement ou quantitativement.
4	EN 292-1 [HAD, 97]	Le risque est la combinaison de la probabilité et de la gravité d'une lésion ou d'une atteinte à la santé pouvant survenir dans une situation dangereuse.
5	PrEN 50126 [HAD, 97]	Le risque est la combinaison de la fréquence (probabilité) et des conséquences d'un accident en termes de gravité du danger, probabilité du risque et accident potentiel.
6	[DES, 95]	Le risque relatif à un événement redouté survenant pendant une activité dangereuse est défini par deux paramètres : • la probabilité d'occurrence de l'événement redouté (probabilité des causes), • la gravité des conséquences qui au final correspondent à des morts, blessures graves, destruction, échec d'une mission, etc.
7	[DES, 03]	Formellement, le risque est une grandeur à deux dimensions notée (p,g) : p est une probabilité qui donne une mesure de l'incertitude que l'on a sur la gravité g des conséquences, en terme de quantité de dommages, consécutifs à l'occurrence d'un événement redouté.
8	PrEN 50128 [HAD, 97]	Le risque est la combinaison de la fréquence, ou probabilité, et de l'effet d'un événement dangereux spécifié.
9	CEI 56 SEC 410 [HAD, 97]	Le risque est la combinaison de la fréquence, ou probabilité, et des conséquences d'un événement dangereux spécifié.
10	[DEQ, 01]	Le risque, relatif au phénomène dangereux considéré, est une fonction de la gravité du dommage possible pouvant résulter du phénomène dangereux considéré et de la probabilité d'occurrence de ce dommage.
11	*[MOD, 93]*	*Le risque peut être défini, quantitativement, par l'ensemble des triplets {scénario d'événements conduisant à l'exposition à un danger ; occurrence de ce scénario ; conséquence de ce scénario, c'est-à-dire une mesure du degré de dommage ou de perte}.*

La définition du risque retenue dans le cadre de cette recherche est la suivante :

Le risque survient lors de la présence simultanée, non prévue et incertaine d'un aléa et d'une cible, ayant pour effet, un écart positif et/ou négatif par rapport à l'atteinte des objectifs de la cible.

En outre, le « risque négatif est la menace qu'un événement, une action ou une inaction, dont la vraisemblance est incertaine, affecte la capacité [d'un système] à atteindre ses objectifs » [Le Ray, 2012].

En revanche, le « risque positif est l'opportunité que, lors d'une action, un événement dont la vraisemblance est incertaine, améliore la capacité [d'un système] à atteindre ses objectifs. » [Le Ray, 2012]

Dans les deux cas, le risque est lié aux objectifs que le système doit atteindre. Il est donc indispensable de définir clairement les objectifs souhaités puisque, le risque peut finalement se définir « comme la possibilité qu'un événement potentiel perturbe l'atteinte des objectifs ».

I.1. Critères de risque

La définition du risque retenue dans le cadre de cette recherche est :

Le risque survient lors de la présence simultanée, non prévue et incertaine d'un aléa et d'une cible, ayant pour effet, un écart positif et/ou négatif par rapport à l'atteinte des objectifs de la cible.

Cela signifie que l'effet de l'aléa caractérisé par son impact sur les objectifs de la cible combiné à la vraisemblance que la cible soit impactée représente le risque. Comme le mentionne Bedford et Cooke [Bedford, 2003], Kaplan et Garrick en 1981 définisse le risque comme un ensemble de scénarii pour chacun desquels est associé une probabilité (vraisemblance) et une conséquence (impact).

Ainsi, généralement la caractérisation d'un risque se fera par la criticité du risque qui se calcule grâce à la probabilité et à la conséquence.

a. Gravité ou exposition du risque

La gravité est la mesure de l'impact des conséquences de l'aléa redouté sur les objectifs de la cible si le risque survient [Le Ray, 2012].

L'exposition est un terme plus générique pour parler de cet impact. En effet, l'exposition représente le « degré auquel un organisme et/ou une partie prenante sont soumis à un événement » [AFNOR, 2010].

b. Vraisemblance du risque

La vraisemblance, « possibilité que quelque chose se produise » [AFNOR, 2010], est le caractère potentiel de la menace à être dommageable pour la cible.

La probabilité de l'événement est souvent remplacée par la fréquence d'un événement comme mesure de la vraisemblance.

c. Criticité du risque

La criticité du risque permet d'estimer le niveau de risque, autrement dit « l'importance d'un risque » [AFNOR, 2010].

Elle se mesure en multipliant la vraisemblance par l'exposition et est souvent assimilée au risque même.

$$\boldsymbol{Criticité} = \boldsymbol{Vraisemblance} \times \boldsymbol{Exposition}$$

I.2. Niveaux de métrique

Les critères de risque peuvent être représentés de manière plus ou moins complexe. Le groupe travaillant sur le projet GERMA (Projet de recherche ANR GERMA (2009) - MAITRISE et GESTION des RISQUES liés au MANAGEMENT des PROJETS COMPLEXES de GENIE CIVIL) [GERMA, 2012] propose ainsi « quatre niveaux de métrique possibles ». Le niveau utilisé pour le management du risque est choisi en fonction de l'enjeu et de la complexité du projet.

a. Niveau 1

Ce niveau est purement qualitatif. La vraisemblance sera par exemple découpée de très faible à très forte (ou s'il s'agit de l'occurrence de très rare à très fréquent) et la gravité de mineure (légère) à majeure (très grave).

Le niveau 1 permet ainsi d'avoir une représentation graphique de la criticité sous forme de matrice, « permettant de classer et de visualiser des risques en définissant des catégories de conséquences et de leur vraisemblance ». (*cf.* Figure 2)

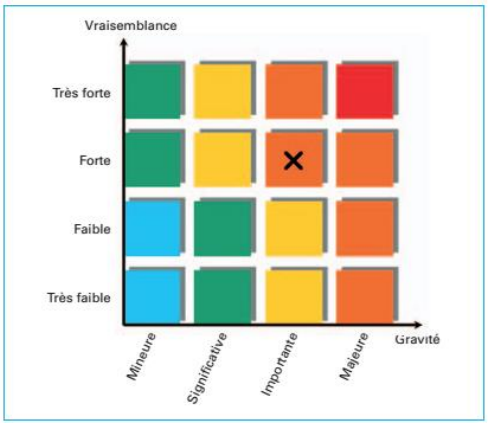


Figure 2 : Matrice d'évaluation des risques [Le Ray, 2012]

Dans cet exemple, la matrice de risque est une matrice 4*4 'conséquence/probabilité'. Ce type de matrice permet de « combiner des classements qualitatifs ou semi-quantitatifs de conséquences et de probabilités pour générer un niveau de risque ou un classement des risques. » [Claude, 2016]. Elle est choisie arbitrairement et permet d'avoir une représentation hiérarchisée des risques principaux. Les couleurs permettent de visualiser les différents niveaux de risque (acceptables à inacceptables). Cependant, le groupe en charge du projet GERMA (2012) conseille « de limiter l'usage de ce type de mesures aux cas de projets d'importance limitée », étant donné que « les erreurs de jugement peuvent être importants et dommageables au projet ». En effet, sur la figure 2, les risques de vraisemblance très forte ne sont pas considérés comme des risques inacceptables et pourtant la multiplicité ou répétition de ces risques peuvent constituer une menace pour le projet.

b. Niveau 2

Le niveau 2 est une évolution du niveau 1. Il permet d'avoir une hiérarchisation des risques plus précise par l'ajout de « règles logiques simples », et/ou par une valeur numérique (sous

forme de 'notes' ou de pourcentage). Ce niveau est lui aussi visualisable sous forme de matrice (*cf.* Figure 3)

Echelle de gravité / fréquences	Gravité légère Nb. décès = 0 blessés légers Profitabilité forte	Assez grave Nb. décès = 0 blessés graves Profitabilité moyenne	Grave Nb. Décès = 1 Blessés graves Profitabilité réduite	Très grave Nb. Décès > 1 Blessés graves Profitabilité très faible
Très fréquent (0,85 < f <1)				
Assez fréquent (0,45 < f < 0,85)				
Peu fréquent 0,15 < f < 0,45				
Très rare F < 0,15				

Figure 3 : Matrice sommaire de risques – projet, encadrée (niveau 2) [GERMA, 2012]

c. *Niveau 3*

Pour les niveaux 3 et 4, l'analyse est quantitative et est appelée dans le monde anglo-saxon Quantitative Risk Analysis ou Assessment (QRA).

Dans le cas, où il y a un seul « indicateur de réussite sur lequel agissent divers facteurs de risque (ou modalités de défaillances) » [GERMA, 2012], une méthode faisant partie de la catégorie QRA peut être utilisée. Il s'agit de la Probabilistic Risk Analysis ou Assessment (PRA). Développée pour l'industrie du nucléaire et répondant à la problématique d'un grand nombre de cibles potentielles et de conséquences pouvant avoir un impact très grave, la PRA est aujourd'hui utilisée dans de nombreuses industries concernées par les risques, comme le transport, l'énergie, l'aéronautique, etc. … [Bedford, 2003].

La première étape de la PRA consiste à éliciter les probabilités de chaque aléa menant au risque au regard des pertes engendrées par les conséquences permettant ainsi d'établir une distribution de probabilités pour chaque aléa.

Ce niveau nécessite l'utilisation d'une métrique qui soit une « échelle d'intervalle » à minima d'où l'élicitation sous forme de distribution de probabilités et non plus de probabilité ou fréquence. Et c'est le principal avantage de ce niveau, qui est une version simplifiée et beaucoup plus facilement applicable que le niveau 4, puisque l'utilisation d'une métrique à échelle d'intervalle permet d'obtenir non plus une échelle qualitative comme dans les niveaux 1 et 2 mais une échelle dite quantitative des conséquences possibles entre la conséquence maximale envisageable et la conséquence minimum envisageable.

En outre, cela permet de ne plus avoir recours à des matrices 'conséquence-probabilité' dont Cox (2008) a démontré, entre autres, qu'elles pouvaient attribuer des scores identiques à des

risques quantitativement très différents, ou attribuer par erreur des scores qualitatifs plus élevés à des risques qui sont plus faibles quantitativement[7].

d. Niveau 4

Dans le niveau 4, les mesures absolues sont de rigueur pour la QRA et la PRA. Cela ajoute une difficulté par rapport au niveau 3. Ce niveau, basé sur des calculs précis, peut être complexe à mettre en œuvre, notamment puisqu'il est nécessaire d'avoir des données quantitatives fiables. Selon GERMA (2012) « l'avantage est d'obtenir des réponses apparemment précises à partir de calculs précis. L'inconvénient est la fiabilité des hypothèses (parfois « héroïques ») de mesure, d'acquisition des données comme de spécification des calculs… » ; Pour ce niveau de métrique, il est plus qu'impératif que des experts du domaine étudié participent à l'analyse de risque.

II. Appréciation du risque

« L'appréciation du risque est le processus global d'identification, d'analyse et d'évaluation du risque » [AFNOR, 2010]. Elle constitue la démarche opérationnelle du management des risques.

II.1. Identifier les aléas et les risques associés

« Processus de recherche, de reconnaissance et de description des risques, l'identification des risques comprend l'identification des sources de risque, des événements, de leurs causes et de leurs conséquences potentielles. » [AFNOR, 2010]

L'identification est une étape incontournable, où les risques sont identifiés et décrits. Cette étape doit permettre de recenser l'ensemble des sources de risque (aléas) (sous contrôle ou non de l'organisme) et les risques qui en découlent, *i.e.* les domaines d'impact des risques, ainsi que les événements ayant une influence sur l'atteinte des objectifs (positifs ou négatifs), leurs causes et conséquences potentielles. La description du risque doit être la plus exhaustive possible, afin de laisser le moins de risques non identifiés et pouvoir par la suite les analyser.

L'utilisation d'outils et de techniques d'identification des aléas et des risques doit être adaptée aux objectifs et aptitudes de l'organisme, ainsi qu'aux risques qui le menacent. L'identification des aléas et des risques se fait avec les personnes possédant les connaissances et l'expérience adéquates (des experts, …), afin que les informations recueillies soient pertinentes et à jour.

[7] Pour plus de précisions se référer à son article [Cox, 2008], ainsi qu'aux articles de Munier et Dehouck [Munier, 2011] et de Claude et Nouet [Claude, 2016].

II.2. Analyser le risque

« Processus mis en œuvre pour comprendre la nature d'un risque et pour déterminer le niveau de risque » [AFNOR, 2010]

L'analyse est une étape de compréhension du risque. Les risques sont ici analysés, afin de récolter les données permettant ultérieurement d'évaluer et de traiter le risque. Elle peut être plus ou moins fine selon la finalité de l'analyse, et les informations, ressources et/ou données disponibles pour la mener à bien. En outre, elle peut être qualitative, semi-quantitative, quantitative, ou une combinaison des trois.

Ainsi, lors de cette étape, des critères (vraisemblance, exposition, …), caractérisant les risques, sont estimés et par conséquent le niveau de risque l'est également. Une hiérarchisation des risques peut alors être entreprise lors de cette étape.

II.3. Évaluer le risque

[Le Ray, 2102] & [AFNOR, 2010]

« Processus de comparaison des résultats de l'analyse du risque avec les critères de risque afin de déterminer si le risque et/ou son importance sont acceptables ou tolérables » [AFNOR, 2010]

Le danger, la cible, la menace et la maîtrise sont des données généralement connues et quantifiables permettant d'évaluer le risque.

Pour déterminer la valeur d'un risque, des critères de risque « termes de référence vis-à-vis desquels l'importance d'un risque est évaluée » [AFNOR, 2010] sont définis.

L'évaluation est l'étape de comparaison du niveau de risque (déterminé pendant l'analyse du risque) aux critères d'acceptation, autrement dit à la limite d'acceptabilité (déterminée au préalable de l'analyse du risque), tout en respectant les obligations légales et réglementaires.

La limite d'acceptabilité est « la frontière […] entre une zone dite « de risques inacceptables » et une zone dite « de risques acceptables » » [Le Ray, 2012]. Ainsi, cette limite permet de déterminer les risques à traiter. Ils devront impérativement être ramenés en deçà de la limite.

Cette limite est cependant souvent propre à chacun. Il est donc important et nécessaire que la limite fixée, le soit le plus objectivement possible et partagée par l'ensemble des acteurs participant à la gestion du risque, afin d'aboutir à un management du risque le plus performant et objectif qui soit [AFNOR, 2010].

Ainsi, l'évaluation permet d'aider à la prise de décision concernant le traitement ou non des risques et la hiérarchisation de la mise en œuvre.

Le traitement du risque étant un « Processus destiné à modifier un risque » [AFNOR, 2010]. Il permet d'atteindre un niveau de risque résiduel acceptable. Ce niveau est atteint par un processus itératif. En effet, une fois le traitement du risque effectué, il convient de vérifier si

les risques résiduels atteignent le niveau souhaité, dans le cas contraire, un nouveau traitement du risque doit être mis en place et ainsi de suite jusqu'à atteinte du niveau de risque résiduel défini.

Le traitement permet la mise en place de moyens de :

a. Prévention

Prévenir le risque revient à prendre des mesures *limitant la vraisemblance* du risque. Autrement dit, la prévention permet de diminuer l'occurrence d'un événement redouté, donc d'éviter que l'événement ne se produise.

b. Protection

Se protéger du risque permet de prendre des mesures *limitant l'exposition*. Il s'agit donc de prendre des dispositions qui limiteront l'impact du risque, donc de rendre l'événement redouté le moins néfaste possible pour le système.

En outre, l'évaluation peut conduire à analyser certains risques de manière plus approfondie.

III. Direction choisie pour répondre à la problématique

Après avoir défini les concepts et présenté l'appréciation du risque, le choix, dans le cadre de cette thèse, s'est porté sur une matrice que nous appellerons matrice 'aléa/impact', afin de s'intéresser à l'impact de l'aléa et de son risque associé sur la performance globale. Ainsi en connaissant les aléas, il est alors possible par la suite d'avoir une action en amont, à la source des risques et pas seulement lorsque le risque est survenu et qu'il est déjà trop tard. En outre nous choisissons de nous situer à un niveau 3, puisque c'est le niveau qui permet d'estimer des échelles quantitatives de conséquences possibles. En effet, nous avons fait ce choix notamment après un certain nombre de réflexions et d'échanges en collaboration avec Claude[8] qui nous a notamment mentionné les travaux de Beaudouin et Munier (2009) précisant que les méthodes de type AMDEC se basent sur des métriques de niveau 1 ou 2 ne parviennent pas à notamment intégrer une vue probabiliste du monde, ni à obtenir des évaluations correctes des risques, ainsi que les travaux de Cox (2008) et Munier et Dehouck (2011) remettant en cause l'utilisation des matrices 'conséquence/probabilité'.

En outre dans le cadre de nos travaux de recherche, l'identification et l'analyse sont les étapes de l'appréciation du risque qui nous intéressent. En effet, avant de chercher à évaluer le risque, il est nécessaire d'identifier d'une part les risques et notamment de connaitre les aléas qui les déclenchent et d'autre part d'analyser l'impact de ces derniers sur la performance globale du bâtiment, avant de chercher à évaluer les risques au regard de critères qui n'ont pas encore été définis par la communauté des acteurs de la construction.

[8] Spécialiste en management des risques

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les concepts clefs du risque et nous avons retenu une définition du risque :

Le risque survient lors de la présence simultanée, non prévue et incertaine d'un aléa et d'une cible, ayant pour effet, un écart positif et/ou négatif par rapport à l'atteinte des objectifs de la cible.

Nous avons ensuite présenté le processus global d'identification, d'analyse et d'évaluation du risque qu'est l'appréciation du risque pour finalement conclure quant au choix fait pour apporter une réponse à la problématique de cette recherche. En effet, nous avons décidé d'utiliser d'une part une métrique de niveau 3 permettant d'estimer des échelles quantitatives de conséquences allant de la conséquence minimale possible à la conséquence maximale possible et d'autre part de construire des matrices 'aléa/impact' afin d'identifier aussi bien le risque que la source, i.e. l'aléa engendrant ce risque, ainsi que l'impact que ce couple 'aléa/risque' peut avoir.

Dans le prochain chapitre, nous présentons les concepts liés aux jugements d'experts, notamment en situation d'incertitude et pourquoi il est important de traiter ces données avec la même rigueur scientifique que les données obtenues « scientifiquement ». Puis nous présentons une méthode, la méthode classique de Cooke (1991) permettant de mesurer et évaluer la capacité des experts à estimer des jugements afin de garantir la fiabilité des données récoltées auprès des experts.

CHAPITRE 3 : COMBINER LES JUGEMENTS D'EXPERTS

« Expert status may be asserted a priori; before advice is provided, or it may measured a posteriori, after advice is provided. »

Burgman et al. in Eliciting Expert Judgments: Literature Review [Burgman, 2006]

Les modèles statistiques basés sur les dire d'experts sont une part importante de l'analyse de risque. [Burgman, 2006] Aussi, il est primordial d'évaluer le statut de chaque expert, a posteriori, une fois que son jugement sur l'information souhaité ait été recueilli. Le jugement de l'expert est évalué en faisant correspondre des prédictions de l'expert au regard de preuve indépendante. Des méthodes d'élicitation, de pondération au regard de la performance et de vérification des jugements d'experts permettent alors d'utiliser ces jugements d'experts avec une rigueur scientifique telle que ce serait le cas avec des données obtenues de manière scientifique.

La question du choix de l'expert et de préférence un 'bon' est proposé dans un premier temps, puis une présentation de l'élicitation des dire d'experts est proposée pour ensuite introduire la combinaison de ces jugements d'experts via une des méthodes existantes, le modèle classique de Cooke (1991). Enfin, la procédure EXCALIBUR permettant de mener à bien le modèle classique est présentée.

I. Comment choisir un 'bon' expert ?

"An expert is someone who has knowledge of an issue at an appropriate level of detail and who is capable of communicating their knowledge."

Meyer and Booker, 1990 [Burgman, 2006]

Un expert est capable de communiquer ses connaissances sur son domaine de prédilection. Cependant, être en mesure de mesurer et d'évaluer la performance de l'expert à donner un jugement sur un domaine précis est essentiel, afin de s'assurer que les données récoltées via les experts soient les plus fidèles à la réalité possible.

En général, selon Burgman [Burgman, 2016], la définition conventionnelle d'un expert est une personne qualifiée, avec une bonne réputation, un bon statut parmi ses pairs et de l'expérience. Elle est considérée comme ayant des qualifications qui ne sont pas accessibles à tous. Autrement dit plus la personne est qualifiée, expérimentée, plus elle est considérée apte à estimer de manière précise.

Burgman (2016) rapporte que lors d'une étude de plus de 20 ans débutée dans les années 1980, Tetlock [Burgman, 2016] a recueilli un grand nombre d'information auprès d'experts – selon la définition conventionnelle – afin de prédire les issues d'événements géopolitiques qu'il a comparé ensuite à ce qui s'est réellement réalisé. L'un des constats fût que les personnes ayant fait les meilleures prédictions n'étaient pas forcément les plus expérimentées ou les plus diplômées ou qualifiées. En outre, pour expliquer certaines des capacités de prédiction, c'est du côté du 'style cognitif' des experts qu'il faut regarder. Notamment, ceux ayant les meilleures dispositions à faire des prédictions, sont ceux qui tirent leurs informations de différentes sources, cherchent différentes explications et surtout ne font pas d'estimations à partir d'une idée ou théorie unique.

Lors d'une étude, Burgman (2016) a également pu constater que les experts auto évaluaient leurs capacités en tant qu'experts de manière assez proche que le faisaient leurs pairs. Cette

évaluation des pairs a lieu parfois même dès la première minute où ils se rencontrent dès lors que chacun ait décrit ses formations, expériences, publications et son appartenance. De plus les scores qu'ils s'étaient attribués les uns aux autres correspondaient à la définition conventionnelle d'un expert. Sachant que les femmes, les jeunes et les personnes moins expérimentées montrent plus d'humilité dans leur manière à se noter que les personnes plus âgées, plus qualifiées et plus expérimentées.

Cependant Burgman (2016) rapporte que les auteurs Potchen (2006) et Aspinall (2010) ont remarqué que les experts les plus prudents, prenant pourtant plus de temps à répondre et avec une plage d'incertitude plus importante répondaient généralement mieux lors des questionnaires de calibration[9]. Ce qui n'aurait probablement pas été le cas si leurs jugements avaient été émis lors de discussions de groupe. Aussi, la confiance des experts en leur capacité ne permet pas de dire si l'expert est plus apte à faire de bonnes prédictions ou non. Les études que Burgman mena lui permirent alors de faire le constat suivant : « there is no relationship between an expert's status, their own or their peers expectations of their performance on questions of fact, and how they actually perform ». Aussi, il est difficile pour les experts de mesurer avec précision leur performance à émettre une estimation, que ce soit leur propre performance ou celle de leurs pairs.

Dans l'ensemble des études menées, une catégorie de scientifiques se distingue cependant. Il s'agit des météorologistes. En effet, ils sont capables de faire des prédictions assez exactes. Burgman (2016) précise que les météorologistes ont fait de la prédiction une réelle compétence contrairement à la plupart des autres disciplines. D'une part ils ont reconnu l'incertitude. D'autre part, ils ont développé des méthodes permettant un feedback individuel instantané. Ils ont utilisé des modèles pour les assister dans la prédiction, ainsi que des données pour valider leurs estimations. Ainsi, ils ont pu améliorer leurs compétences en matière de prédiction. Et surtout ils connaissent leurs limites et ne font pas de prédictions au-delà de 5 jours. Finalement [Burgman, 2016] les experts, tels que les météorologistes, ou encore les parieurs professionnels et les joueurs de bridge, sont considérés communément comme des personnes qui ne font pas toujours des bonnes prédictions, alors qu'au contraire elle font d'assez bonnes estimations.

Enfin Burgman (2016) a recensé plusieurs études menant à la conclusion que bien que les experts – selon la définition conventionnelle – font de meilleures estimations que les non-initiés, la différence n'est pas considérable. En outre, les étudiants font souvent des estimations presque aussi bonnes que celles des experts et avec les mêmes biais.

En effet, dès la fin des années 70, Tversky et Kahneman [Tversky, 1974] ont mis en évidence le fait que chaque personne est soumise à des habitudes et des biais influençant leur manière de juger et de percevoir.

[9] Ces questionnaires sont mis en place afin de déterminer la performance des experts à éliciter des jugements, des opinions qui s'avèrent être proche de la réalité (*cf.* PARTIE 1 : CHAPITRE 3 : III)

Finalement, Pigeon (2008) rappelle que dans le cas où un avis d'expert[10] est attendu, alors un expert est une personne ayant un « savoir à propos de la variable d'intérêt », la variable d'intérêt étant la variable pour laquelle la quantité cherche à être connue alors qu'il y a situation d'incertitude. Un expert est donc choisi car étant reconnu comme possédant des « bonnes connaissances » au regard du domaine d'intérêt.

II. Eliciter les dire d'experts

L'opinion des experts est élicitée sous forme d'une distribution de probabilités obtenue grâce à un certain nombre de quantiles [Pigeon, 2008], permettant ainsi de diviser le jeu de données ordonnées obtenu pour qu'un événement soit vraisemblable, qu'il se produise en intervalles consécutifs et généralement contenant le même nombre de données

A chaque quantile q_i choisi où i est un pourcentage compris entre 0 et 100 % (*cf.* ANNEXE B - Résumés numériques des données), l'expert e associe pour chaque variable j une quantité incertaine x_{jie}. Ainsi si l'expert donne pour les quantiles q_a et q_b (a et b étant la valeur du quantile en pourcentage), les valeurs x_{jae} et x_{jbe} tel que a < b, il exprime ainsi que la probabilité que la vraie valeur soit entre q_a et q_b est (a – b).

L'expert peut exprimer la quantité incertaine soit sous forme de pourcentage ou par un nombre compris entre 0 et 1. Ainsi Roy (1963) précise qu' « il est donc raisonnable de songer à repérer par un nombre le degré de certitude attaché à la réalisation d'un événement. Ce nombre, appelé probabilité, varie par convention, de 0 à 1 et croît avec le degré de certitude relatif à la réalisation de l'événement : Il vaut 0 lorsque cette réalisation est quasi-impossible, et 1 lorsqu'elle est quasi certaine. »

Ainsi la variable ou la quantité x_i incertaine élicitée par l'expert représente l'opinion de l'expert sous forme de probabilité subjective au regard d'une situation incertaine et de ses connaissances dans le domaine.

Après avoir obtenu la probabilité subjective x_i pour chaque quantile q_i pour une même variable, la courbe obtenue (*cf.* Figure 4) est la fonction de répartition subjective de la variable estimée par l'expert pour la question posée.

[10] « Le terme « avis d'expert « désigne l'expression, sous forme probabiliste, de la connaissance d'un expert à propos d'une quantité incertaine. » [Pigeon, 2008]

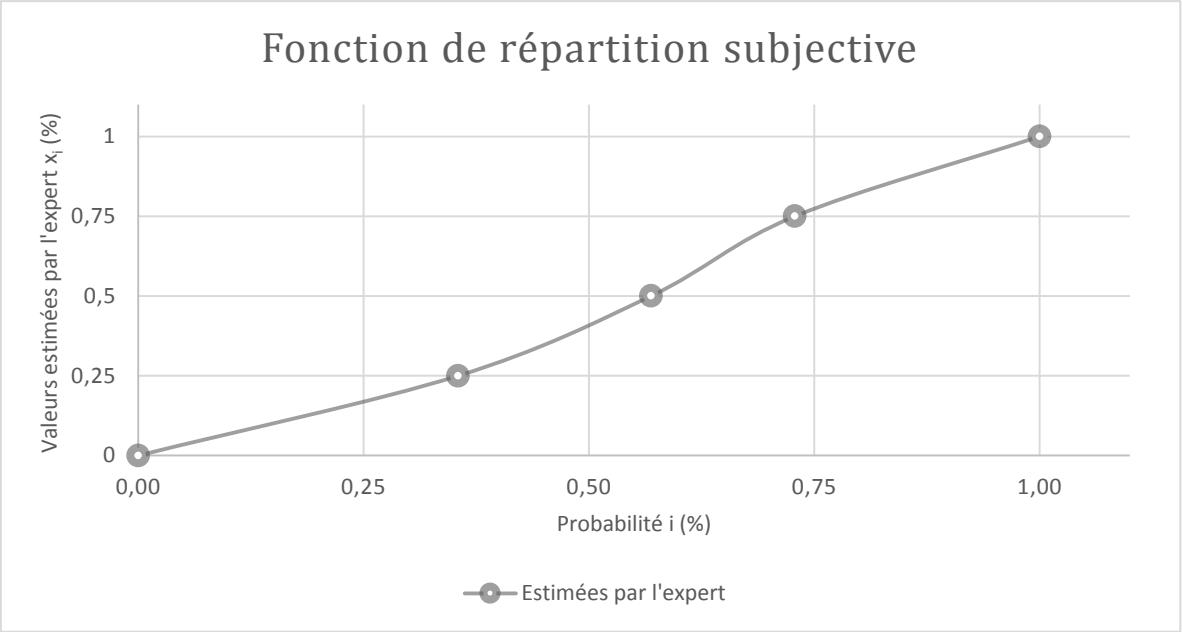


Figure 4 : Distribution de probabilités cumulative et subjective

Une fois les distributions de probabilités cumulatives et subjectives obtenues pour chaque expert et chaque variable, il est important de savoir quelle est la performance de l'expert à émettre une opinion, un jugement pour une quantité incertaine.

III. Combiner les jugements d'experts

Les jugements d'experts émis sous forme de probabilités subjectives nécessitent d'être combinés afin d'obtenir une probabilité subjective la plus représentative de la réalité possible. Cependant, il n'y a pas une unique et 'bonne' manière de combiner entre eux des jugements d'experts. En revanche Burgman (2016) indique que certaines ne permettent pas de les combiner correctement.

Cette combinaison peut se faire, soit en assignant un poids égal à chacun des experts, soit différentes pondérations au regard de la performance des experts à éliciter des jugements au plus proche de la réalité.

Selon Burgman, deux grands types de méthodes permettent de combiner les jugements d'experts :

- 'Behavioural aggregation' : agrégation comportementale

Une réunion structurée d'experts permet de trouver une estimation par consensus des experts. Un animateur mène la réunion. Les experts présentent chacun leur point de vue aux autres. Ensuite plusieurs approches peuvent être adoptées par l'animateur pour déconstruire la logique de chaque argumentaire afin d'opposer les points de vue. L'animateur peut clore la séance lorsque qu'une des situations suivantes est atteinte :

- ‘Sound argument’ : Un argument solide, une position dite ‘correcte’ est identifiée et les autres points vue sont considérés comme incorrects ;
- ‘Consensus’ : Un consensus est atteint entre les experts. Une des opinions est considérée comme la ‘meilleure’ ;
- ‘Négociation’ : Une solution est considérée comme acceptable pour tous les experts participants, elle est ‘juste’ plutôt que correcte ;
- ‘Natural death’ : le conflit va décliner graduellement jusqu’à être ignoré parce que souvent il se révèle ne pas être important ;
- ‘Procédure’ : les règles formelles permettent de mettre fin aux arguments prolongés ;
- ‘Résolution’ : Résolution via élimination, atténuation ou acceptation des différences entre les jugements d’experts.

Cependant, clore une telle réunion n’est pas toujours garanti, ni forcément bienvenu. En effet des désaccords entres les experts peuvent refléter des désaccords légitimes de jugements. D’autant plus qu’un consensus ne reflète pas forcément une information partagée mais un désir, un égard pour l’atteinte d’un consensus scientifique non justifié par les données. En revanche, il est préférable d’éliminer les éléments de désaccords arbitraires de type ambiguïté ou par manque de précision.

- ‘Numerical aggregation’ : agrégation numérique

Ce type d’agrégation utilise des stratégies quantitatives afin de combiner les opinions des experts. Dans le cas d’estimations probabilistes, l’utilisation d’outils de statistique est requise. Les jugements d’experts seront alors combinés soit en considérant la même pondération pour tous les experts ou une pondération en fonction de la performance des experts à estimer un jugement pour une quantité incertaine. Ainsi, plus l’experts est performant, i.e. proche de la vérité, plus sa pondération est élevée. Des méthodes permettent de déterminer au mieux la performance des experts à estimer des jugements comme notamment la ‘classical model method’ de Cooke (1991) ou le protocole IDEA (basé sur la méthode Delphi) de Burgman (2016).

Ces méthodes comportent à minima les étapes suivantes [Pigeon, 2008] :

1. Choix des experts ;
2. Recueil des informations auprès des experts ;
3. Evaluation des informations récoltées ;
4. Combinaison des opinions des experts afin d’obtenir une opinion unique.

IV. Modèle classique de Cooke

Le modèle classique (classical model) proposé par Cooke en 1991, a été nommé ainsi par analogie avec les tests d'hypothèse classique et par contraste avec les modèles Bayesien, afin d'aboutir à un jugement d'expert structuré. L'idée est d'obtenir un consensus rationnel entre les différents experts en condition d'incertitude. Cooke [Cooke, s.d.] précise que « le fait qu'un groupe d'agents rationnels n'est pas en soi un agent rationnel, le consensus rationnel ne se préoccupe pas du changement de croyances de l'individu ; mais plutôt de trouver une représentation d'incertitude qui sera utilisée dans un contexte de décision de groupe ». Afin d'obtenir un consensus rationnel, les conditions sont les suivantes :

- « Scrutabilité » et responsabilité : Toutes les données (noms d'experts, évaluations, outils d'évaluation) doivent être accessibles aux fins d'examen par les pairs ; les résultats doivent pouvoir être reproduits par des examinateurs compétents ;

- Contrôle empirique : Un contrôle empirique de la qualité assujettit les évaluations quantitatives des experts ;

- Neutralité : La méthode utilisée pour évaluer et combiner les opinions des experts doit encourager les experts à répondre honnêtement et ne doit pas biaiser les résultats ;

- Equité : Aucun préjugé sur les experts ne doit être émis avant le traitement de leurs évaluations et des résultats.

Cooke [Cooke, s.d.] précise que ces conditions sont nécessaires mais pourtant pas nécessairement suffisantes pour aboutir à un consensus rationnel et il ajoute « [qu']un sujet rationnel pourrait accepter ces conditions et rejeter une méthode qui les met en œuvre », aussi c'est à ce sujet de préciser des conditions supplémentaires pour obtenir un consensus rationnel s'il juge que la méthode utilisée viole ce consensus rationnel.

Le modèle classique a permis d'opérationnaliser les conditions ci-dessus. C'est une méthode formelle [Aspinall, 2008 ; Cooke, s.d. ; Pigeon, 2008] permettant de :

- Déterminer le poids associé à la capacité, la performance d'un expert à émettre des jugements en situation incertaine ;

- Combiner des jugements d'experts élicités sous forme de distribution de probabilités en une distribution agrégée, il s'agit d'agréger les distributions de probabilité du panel d'experts de façon linéaire[11] au regard des poids de chaque expert, donc en faisant une moyenne pondérée.

Cooke (2015) précise que les « experts can be treated as statistical hypotheses whose statistical accuracy and informativeness are objectively measured. Performance metrics are

[11] Le choix d'utiliser une combinaison linéaire des avis d'experts dans le cas d'un modèle non bayésien comme celui proposé par Cooke (1991) est largement développé par Pigeon (2008) dans le chapitre 4.

used to construct performance-based combinations of expert judgments, also subject to validation. »

Le poids résulte de deux mesures quantitatives de la performance des experts à estimer l'incertitude :

- Calibration, c'est un étalonnage des jugements d'experts au regard de valeurs de références appelées variables de calibration, autrement dit une mesure de cohérence entre les données élicitées par l'expert et celles de références ;
- Informativité / Renseignement, c'est une mesure de la précision de l'information, en fonction de la façon dont l'information est concentrée.

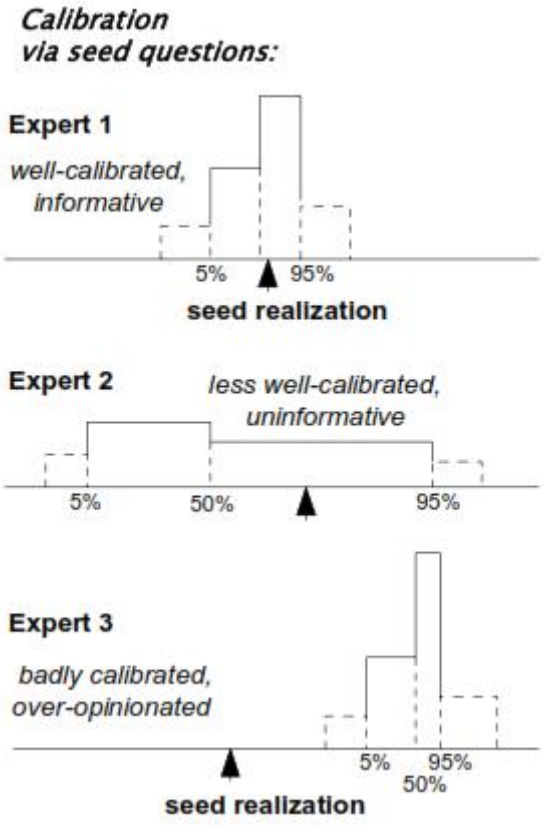


Figure 5 : Schémas comparant des experts plus ou moins bien calibrés et informatifs sur les questions de calibrations, (extrait d'un schéma) [Aspinall, 2008]

Ces deux mesures sont associées afin d'obtenir pour chaque expert un poids w_e qui lui est associé, ainsi qu'une note globale pour un expert fictif étant la combinaison des opinions d'un panel d'experts. Notamment le score de calibration domine celui de « l'informativité », ce dernier permet de moduler des jugements d'experts qui auraient obtenus une calibration plus ou moins égale [Cooke, s.d.]. Sur la Figure 5, trois types d'experts au regard de leur calibration et de leur informativité sont présentés.

Les variables de calibration doivent être nécessairement en relation avec les variables d'intérêt, les variables pour lesquelles une quantité incertaine est à estimer, puisque les variables de calibration permettent de [Cooke, s.d.] :

- Quantifier la performance des jugements d'experts à évaluer des probabilités subjectives en situation d'incertitude, c'est-à-dire à évaluer une quantité incertaine ;
- Combiner les distributions des jugements d'experts afin d'obtenir une distribution pour un expert fictif ayant une performance optimisée à évaluer des probabilités subjectives en situation d'incertitude ;
- Evaluer et « espérer » valider la combinaison des jugements des experts.

Afin d'expliquer comment les deux mesures quantitatives, ainsi que la combinaison en expert fictif des données sont calculés, positionnons nous dans le cas d'utilisation du modèle classique. Les données sont demandées pour le 50^{e} quantile qui est la médiane, et pour le 5^{e} et le 95^{e} quantile qui représentent la plage vraisemblable d'incertitude, la plage dans laquelle la valeur à estimer est vraisemblablement contenue selon l'expert. Ainsi, il existe une probabilité de 5 % que la valeur à estimer tombe en dessous de celle donnée par l'expert pour le 5^{e} quantile et une probabilité de 5 % que la valeur à estimer par l'expert tombe au-dessus de celle donnée par l'expert pour le 95^{e} quantile.

Ainsi si l'expert élicite les données pour n = 3 quantiles i = {5, 50, 95), alors le jeu de données d'un experts e est théoriquement séparé en n +1 = 4 intervalles inter-quantiles de probabilité égale à p %. Il existe donc un vecteur p représentant la probabilité théorique que la vraie valeur x_j de chaque variable se situe dans l'un des 4 intervalles. Il exprime les probabilités théoriques de chaque intervalle n :

p = (p_1=0,05, p_2=0,45, p_3=0,45, p_4=0,05) avec

- p_1 = 0,05 – 0 = 0,05 ;
- p_2 = 0,50 – 0,05 = 0,45 ;
- p_3 = 0,95 – 0,50 = 0,45 ;
- p_4 = 1 – 0,95 = 0,05.

Ce vecteur est le même pour tous les experts puisqu'il est théorique. Ainsi pour un expert considéré comme performant à éliciter des quantités incertaines, dans le cas où il évaluerait un très grand nombre de variables de calibration, il serait logique que dans 5 % des cas la vraie valeur se situe dans son premier intervalle inter-quantile p_1, dans 45 % des cas dans son second intervalle inter-quantile p_2, dans le troisième intervalle inter-quantile p_3 dans 45 % des cas également et enfin dans les 5 % des cas restants la vraie valeur se trouverait dans son dernier intervalle inter-quantile p_4.

Pour N variables de calibration pour lesquelles chaque expert à éliciter une distribution de probabilités subjective en attribuant aux n quantiles une quantité subjective, alors pour

chaque variable de calibration, puisque les vraies valeurs sont connues, il est possible de savoir où la vraie valeur se situe au regard de la distribution établie par l'expert.

Ainsi un vecteur s(e) associé à chaque expert peut être déterminé. Ce vecteur est appelé distribution d'échantillonnage et permet de voir l'expert comme une hypothèse statistique sur N réalisations (puisqu'il y a N variables de calibration).

En effet, le vecteur s(e) où chaque $s_m(e)$ représente la proportion de vraies valeurs pour l'ensemble des variables de calibration élicitées comprise dans chaque intervalle m = n+1 de l'expert e. Soit x_j, la vraie valeur de la variable j et x_{je} une quantité incertaine élicitée par l'expert e pour chaque variable de calibration j = 1, 2, …, N et chaque quantile i = 1, 2, …, n.

Alors:

$s(e) = (s_1, s_2, s_3, s_4) = s(e)$ avec

- $s_1(e)$ = nombre de fois où la vraie valeur j sur les N variables de calibration se trouve dans l'intervalle $x_j \leq x_{j1e}$;
- $s_2(e)$ = nombre de fois où la vraie valeur j sur les N variables de calibration se trouve dans l'intervalle $x_{j1e} < x_j \leq x_{j2e}$;
- $s_3(e)$ = nombre de fois où la vraie valeur j sur les N variables de calibration se trouve dans l'intervalle $x_{j2e} < x_j \leq x_{j3e}$;
- $s_4(e)$ = nombre de fois où la vraie valeur j sur les N variables de calibration se trouve dans l'intervalle $x_{j3e} < x_j$;

Ainsi la distribution d'échantillonnage s(e) obtenue pour chaque variable j dépend de l'expert e puisqu'il exprime sa propre croyance au regard d'un ensemble de variable de calibration dont lui ne connait pas la vraie valeur.

Par exemple pour l'expert a ayant répondu à N = 10 variables de calibration pour le 5^e, le 50^e et le 95^e quantile dont les données sont répertoriées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Elicitation des distributions de probabilité subjectives pour 10 variables de calibration pour l'expert a

Variable de calibration	Vraie valeur	Valeur xj1e pour le 5e quantile	Valeur xj2e pour le 50e quantile	Valeur xj3e pour le 95e quantile
1	25,2%	5	15	20
2	9,1%	1	5	10
3	23,2%	1	3	5
4	33,1%	5	15	20
5	8,0%	1	3	5
6	22,6%	1	3	5
7	55,6%	40	45	55
8	32,0%	50	70	80
9	91,0%	85	90	95
10	80,0%	80	85	90

La distribution d'échantillonnage de cet expert a est établie comme détaillée dans le Tableau 3 :

Tableau 3 : Explication pour déterminer la distribution d'échantillonnage de l'expert a

Variable de calibration	Vraie valeur	s1 (xj ≤ xj1e)	s2 (xj1e < xj ≤ xj2e)	s3 (xj2e < xj ≤ xj3e)	s4 (xj3e < xj)
1	25,2%	0	0	0	1
2	9,1%	0	0	1	0
3	23,2%	0	0	0	1
4	33,1%	0	0	0	1
5	8,0%	0	0	0	1
6	22,6%	0	0	0	1
7	55,6%	0	0	0	1
8	32,0%	1	0	0	0
9	91,0%	0	0	1	0
10	80,0%	1	0	0	0
Proportion (Somme / (N=10)) représentant le vecteur s(e)		**0,2**	**0**	**0,2**	**0,6**

Ainsi le vecteur pour cet expert, qui représente la distribution d'échantillonnage, est s(a) = (0,2 ; 0 ; 0,2 ; 0,6). Cela signifie notamment que cet expert a dans 60 % des cas tendance à répondre au-dessus de la vraie valeur, donc à surévaluer le risque.

Hypothétiquement s(a), la distribution d'échantillonnage de l'expert a doit être la plus proche de p = (0,05 ; 0,45 ; 0,45 ; 0,05), la distribution théorique représentant la probabilité théorique

que la vraie valeur d'une variable de calibration se situe dans l'un des 4 intervalles. La calibration permet de connaitre la proximité entre ces deux distributions.

a. Calibration

La calibration C(e) mesure la vraisemblance statistique qu'un jeu de données obtenu de manière expérimentale ou faisant figure de référence (vraies valeurs) corresponde à l'évaluation élicitée par l'expert. Ainsi il s'agit de regarder la distance entre la distribution théorique p et la distribution de l'échantillonnage s(e) sur N réalisations (variables de calibration) obtenue de manière empirique. En effet, il est important de déterminer la capacité de l'expert à éliciter une valeur la plus proche de la valeur vraie de manière à mesurer s'il est performant pour cela. Cela ne remet pas en cause ses compétences mais caractérise le fait que l'expert est effectivement capable d'exprimer une opinion pour une quantité incertaine. En outre, les valeurs que l'expert estime doivent être celles auxquelles il croit vraiment dans le but de maximiser le poids qui lui sera associé. En effet, le but d'une étude comme celle-ci n'est pas de déterminer la capacité de l'expert à améliorer sa capacité à éliciter des quantités incertaines les plus proches de leurs valeurs vraies. Les besoins ici sont d'avoir des experts déjà capables d'éliciter au mieux des quantités incertaines au regard de leurs connaissances et en toute franchise. Aussi il est nécessaire que l'expert n'influence pas ses réponses dans le but que sa distribution d'échantillonnage s(e) soit proche de la distribution théorique p. Il est donc nécessaire qu'il y ait indépendance entre ces deux distributions.

Ainsi l'utilisation d'un test statistique simple comme « chi carrée » permet de déterminer si la différence entre les deux distributions théoriques p et d'échantillonnage s(e) est due à la capacité réelle de l'expert à exprimer son opinion le plus justement possible en situation d'incertitude et non attribuable au fait que l'expert n'ait pas exprimé son opinion honnêtement. De cette manière il est possible de vérifier si il y a bien indépendance entre les deux distributions et auxquels cas de s'assurer que la distance entre les deux distributions est bien celle due à la capacité de l'expert à évaluer une quantité incertaine.

La calibration se calcule grâce à la formule suivante [Cooke, 1992] :

$$C(e) = 1 - Chi_R^2\big(2 * N * I(s(e), p)\big)$$

Où

- Chi^2_R : fonction de distribution cumulative du Chi carré avec R degré de liberté ;
- *R* : nombre de quantiles (dans notre exemple : 3) ;
- *N* : nombre de variables de calibration ;
- *I(s(e),p)* : information relative de la distribution d'échantillonnage s(e) par rapport à la distribution théorique p

$$I(s(e), p) = \sum_{i=1}^{n} s_i \ln\left(\frac{s_i}{p_i}\right)$$

– e : expert pour qui la calibration est calculée.

L'information relative utilisée ici permet de calculer la distance entre les deux distributions. Si les distributions sont identiques alors *I(s(e),p)* est nulle.

La calibration permet donc d'évaluer la qualité de l'information fournie par l'expert e. Plus ses prédictions sur l'ensemble des variables de calibration sont proches des valeurs vraies plus sa calibration augmente et donc son poids augmente, a contrario, plus il s'écarte des valeurs vraies est plus sa calibration diminue et donc son poids également.

b. Informativité / Renseignement

L'informativité d'une distribution indique le degré de concentration de la distribution. Elle n'est pas mesurée de manière absolue mais relativement à d'autres distributions. La distribution de référence est soit uniforme soit log-uniforme. Elle permet de comparer la manière dont est concentrée la distribution élicitée par l'expert au regard de cette distribution de référence pour la variable de calibration [Aspinall, 2008 ; Cooke, 2014]. Le choix d'une distribution uniforme comme référence est dû au fait que ce type de distribution est souvent considéré comme « synonyme d'absence d'information » [Pigeon, 2008].

L'informativité est en fait un calcul d'entropie. L'entropie est généralement connue par le biais du deuxième principe de la thermodynamique, qui postule que l'état d'équilibre d'un système isolé est l'état d'un système dont l'entropie est maximale. L'entropie permet donc de mesurer le degré de désordre d'un système. En statistique, l'entropie permet de mesurer le degré d'incertitude sur l'état exact d'un système. Quand il n'y a pas d'ambiguïté donc certitude par rapport à l'état d'un système, alors l'entropie est minimale. Alors que plus l'incertitude devient grande est plus l'entropie le devient également. Ainsi l'entropie permet de mesurer le degré d'information que va apporter l'expert : si l'entropie est minimale alors cela signifie qu'il y a peu de désordre donc que la distribution élicitée par l'expert se rapproche d'une loi uniforme et elle n'est pas concentrée autour de la valeur centrale tandis que si l'entropie est grande, alors la distribution de l'expert s'écarte d'une loi uniforme et elle est concentrée autour de la valeur centrale.

Ainsi dans le modèle classique l'entropie permet de mesurer la distance entre la distribution élicitée par l'expert et une distribution uniforme [Pigeon, 2008].

Soit une distribution élicitée par l'expert e pour n quantiles donc n+1 intervalles interquantiles et N variables de calibration, alors l'entropie est une moyenne sur k = 1, 2, …, N de l'information relative de la distribution élicitée par l'expert par rapport à une distribution uniforme de référence déterminée sur le domaine de la variable de calibration, cette distribution étant identique pour tous les experts. Ainsi le score d'informativité se calcule grâce à la formule suivante [Cooke, 2014] :

$$Inf(e) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} I(f_{e,k}, g_k)$$

Où

- $f_{e,k}$: densité de l'expert e pour la variable de calibration k ;
- g_k : densité uniforme (ou log-uniforme) de référence pour la variable de calibration k ;
- N : nombre de variables de calibration ;
- $I(f_{e,k},g_k)$: information relative de la distribution élicitée par l'expert par rapport à une distribution uniforme de référence

Il existe un risque que l'expert soit tenté de faire en sorte que les quantités élicitées pour chaque quantile soit proche les unes des autres pour améliorer son score d'informativité, ce qui dégraderait probablement son score de calibration [Aspinall, 2008]. Cependant le score d'informativité dépend de l'évaluation de l'informativité des autres experts. Ainsi le score d'informativité est peu affecté par des grandes variations sur l'ensemble des élicitations de l'expert contrairement au score de calibration. Dès lors le poids de l'expert est dû en grande partie au score de calibration. Cela permet ainsi que l'expert n'influence pas son score en proposant des distributions très concentrées alors que sa performance statistique calculée grâce à la calibration est mauvaise [Aspinall, 2008].

c. Poids

Le poids de l'expert w_e [Cooke, 2014] est calculé grâce au produit du score de calibration et du score d'informativité tel que :

$$w_{\propto}(e) = C(e) * Inf\ (e) * Ind_{\propto}\big(C(e)\big)$$

Où Ind_{α} est une fonction d'agrégation où $Ind_{\alpha}(x) = 0$ si $x < a$ et $Ind_{\alpha}(x) = 1$ sinon, basée sur le score de calibration de l'expert. Cela garantit que le poids de l'expert ne prenne pas de valeur nulle seulement si son score de calibration est inférieur à une valeur limite a définie au préalable. En outre, un choix judicieux de a peut permettre de maximiser le poids combiné de l'expert fictif combinant l'ensemble des distributions élicitées pour les variables d'intérêt des experts. a est généralement choisi à 5 %. Ainsi il est courant que des membres du panel d'experts aient un poids nul [Aspinall, 2008]

d. Combinaison des données pour les variables d'intérêts

Ainsi, connaissant les poids w_e de chaque expert, les distributions de probabilités subjectives de chaque expert peuvent être combinées ensemble pour chaque variable d'intérêts.

La distribution agrégée normalisée $F_{\alpha}(i)$ pour une variable d'intérêt i pour laquelle les n experts ont élicité une distribution $F_{e,i}$ se calcule grâce à cette formule [Cooke, 1992] :

$$F_{\propto}(i) = \frac{\sum_{e=1}^{n} w_e * F_{e,i}}{\sum_{e=1}^{n} w_e}$$

e. *Optimisation de l'expert fictif combinant l'ensemble des experts au regard de leurs poids*

Il s'agit de maximiser le poids de l'expert fictif e_f en choisissant au mieux la valeur de a, afin d'obtenir une distribution agrégée normalisée pour un poids global (i.e. de l'expert fictif) optimisé noté F_{a*} où a^* maximise le produit [Cooke, 2014] :

$$C(F_{\propto}^{*}) * Inf(F_{\propto}^{*})$$

Le poids de l'expert fictif peut être calculé en considérant que l'expert fictif est pondéré comme les autres experts du panel. Généralement l'expert fictif optimisé performe mieux que le résultat d'une combinaison équiprobable et généralement il n'est pas significativement moins bon que le meilleur expert du panel [Aspinall, 2008].

V. Procédure de jugement d'expert structuré – EXCALIBUR Procedure

Dans le cadre de ce travail de thèse, la procédure EXCALIBUR (anciennement EXCALIBR [Cooke, 1992]) pour obtenir des jugements d'expert structuré (structured expert judgment procedure) est choisie. Cette procédure est associée à un logiciel disponible sur internet[12] qui se base sur le modèle classique de Cooke (1991).

Aspinall (2008) indique que les étapes principales pour appliquer la procédure EXCALIBUR sont les suivantes :

- Un groupe d'expert est sélectionné ;
- Les experts élicitent individuellement les variables d'intérêt ;
- Les experts élicitent individuellement les variables de calibration ;
- Les scores de calibration et d'informativité des experts sont déterminés au regard de leurs réponses aux questions de calibration pour lesquelles les vraies valeurs sont connues ;
- Les poids des experts sont déterminés grâce à la combinaison des scores, sachant qu'il est considéré comme un poids maximal attendu si et seulement si l'expert élicite les variables d'intérêt en accords avec ses vraies croyances ;
- Les distributions des variables d'intérêt sont combinées grâce au poids des experts pour obtenir une distribution agrégée par variable d'intérêt.

Ces étapes ont permis d'inspirer certaines étapes de la méthode proposée dans ce manuscrit.

[12] Disponible sur http://www.lighttwist.net/wp/excalibur

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons apporté des réponses sur la qualification d'un 'bon' expert en présentant les travaux notamment de Cooke et de Burgman, entre autres, qui ont constaté que souvent les jugements d'experts ne sont pas traités comme des données dites scientifiques alors que ces jugements, subjectifs par essence, n'offrent aucune garantie d'être fiables et proches de la réalité et même souvent au contraire. Ainsi nous avons d'abord présenté comment éliciter les jugements d'experts, en adoptant une approche par échelle quantitative et donc en demandant aux experts d'éliciter des distributions de probabilité pour les variables d'intérêt, celles pour lesquelles nous avons besoin d'information. L'intérêt de combiner les jugements d'experts de manière 'scientifique' en les pondérant grâce à des poids prenant en compte leur performance à estimer des jugements au plus proche de la réalité a été démontré pour fiabiliser ces jugements d'experts. Enfin, la méthode classique de Cooke et la procédure EXCALIBUR associée pour mener à bien la combinaison des jugements d'experts de manière 'scientifique' ont été présentées.

Dans cette première partie nous avons dans un premier chapitre présenté le contexte et positionné la thèse. En effet, un état de l'art du risque dans la construction est d'abord proposé. Il met en exergue le fait que le domaine du bâtiment manque de culture du risque. Cependant plusieurs méthodes, outils, processus proposent d'appréhender et de prendre en compte le risque dans ce domaine. En outre nous avons montré qu'il est nécessaire de s'intéresser à l'impact de l'intégration d'un composant de construction dans un bâtiment puisque chaque composant de construction intégré pour améliorer une ou plusieurs performances du bâtiment peut en dégrader une ou plusieurs autres et ainsi dégrader dans son ensemble la performance dite globale du bâtiment. Et afin de répondre à cette problématique nous avons montré qu'il était important de prendre le problème en considérant le fait que la complexité et l'incertitude nécessitent d'être prises en compte tout en ayant une approche transversale, transdisciplinaire et systémique afin d'exploiter le retour d'expériences et ce avec précaution. Enfin nous avons présenté le contexte et la problématique de ces travaux de recherche, ainsi que l'objectif principal qui est d'évaluer l'impact de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie.

Dans le second chapitre, nous avons défini les concepts clefs du risque et nous avons retenu une définition du risque : Le risque survient lors de la présence simultanée, non prévue et incertaine d'un aléa et d'une cible, ayant pour effet, un écart positif et/ou négatif par rapport à l'atteinte des objectifs de la cible. Puis nous avons présenté le processus global d'identification, d'analyse et d'évaluation du risque qu'est l'appréciation du risque pour finalement conclure quant au choix fait pour apporter une réponse à la problématique de cette recherche. En effet, nous avons décidé d'utiliser d'une part une métrique de niveau 3 permettant d'estimer des échelles quantitatives de conséquences allant de la conséquence minimale possible à la conséquence maximale possible et d'autre part de construire des matrices 'aléa/impact' afin d'identifier l'aléa et le risque engendré, ainsi que l'impact que ce couple 'aléa/risque' peut avoir.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous avons apporté des réponses sur la qualification d'un 'bon' expert en présentant les travaux notamment de Cooke et de Burgman qui ont démontré l'importance de traiter les jugements d'experts avec la même rigueur scientifique que les données obtenues « scientifiquement » puisque ces jugements, subjectifs par essence, n'offrent aucune garantit d'être fiables et proches de la réalité. Ainsi nous avons d'abord présenté comment éliciter les jugements d'experts, en adoptant une approche par échelle quantitative en demandant aux experts d'éliciter des distributions de probabilité pour les variables d'intérêt, celles pour lesquelles nous avons besoin d'information. Puis nous avons présenté l'intérêt de combiner les jugements d'experts de manière 'scientifique' en les pondérant grâce à des poids prenant en compte leur performance à estimer des jugements au plus proche de la réalité pour fiabiliser ces jugements d'experts. Enfin, pour mener à bien la combinaison des jugements d'experts de manière 'scientifique', la méthode classique de Cooke et la procédure EXCALIBUR associée ont été présentées.

Dans la partie suivante, la méthode développée dans ces travaux de recherche est présentée et est détaillée. Cette méthode permet l'évaluation de l'impact de l'intégration d'un composant sur la performance globale du bâti. Elle se base sur le retour d'expériences issues d'experts du domaine de la construction. Aussi cette méthode utilise les concepts présentés dans le troisième chapitre de la première partie pour éliciter les jugements d'experts et les fiabiliser en les pondérant au

regard de la performance de l'expert à estimer des valeurs en situation d'incertitude. En outre, elle repose sur une approche systémique puisqu'elle permet l'évaluation de l'impact sur l'ensemble des objectifs de performance à atteindre pour qu'un bâtiment soit performant.

Dans un premier chapitre les composants de construction sont définis puis la méthode est décrite dans un second chapitre.

PARTIE 2 : METHODE D'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'INTEGRATION D'UN COMPOSANT SUR LA PERFORMANCE GLOBALE DU BATI

Maintenant que la problématique, ainsi que les concepts clefs ont été énoncés, cette partie présente la méthode proposant de répondre à la problématique de cette recherche. Ainsi le premier chapitre permet de définir et distinguer les composants de construction, puis le second chapitre présente la méthode proposée pour l'évaluation de l'impact de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie.

CHAPITRE 1 : COMPOSANTS DE CONSTRUCTION

Dans cette recherche, l'impact du composant de construction est l'objet même des travaux menés. Aussi avant de présenter la méthode proposée pour répondre à la problématique, il est essentiel de présenter les composants de construction.

Ce chapitre permet donc de définir ce qu'est un composant de construction puis de faire la distinction entre les composants largement diffusés et les composants innovants.

I. Définir un composant de construction

Les composants de construction regroupent les matériaux, les produits et les procédés de construction.

Le Règlement Produit Construction européen, 2011 [RPC, 2011] défini un « produit de construction » ainsi : « tout produit ou kit fabriqué et mis sur le marché en vue d'être incorporé de façon durable dans des ouvrages de construction ou des parties d'ouvrages de construction et dont les performances influent sur celles des ouvrages de construction en ce qui concerne les exigences fondamentales applicables auxdits ouvrages ».

Le dictionnaire général du bâtiment, DICOBAT online fournit la définition suivante pour un « procédé [de construction] » : « Ensemble cohérent de techniques et de matériaux complémentaires mis en œuvre pour atteindre un objectif : par exemple, procédé d'isolation thermique, procédé d'asséchement des murs, procédé d'étanchéité des terrasses… ».

Concernant un « matériau [de construction] », ce même dictionnaire donne la définition ci-après : « Composant de construction au sens le plus large. Le mot est souvent associé à un qualificatif qui décrit une caractéristique primordiale ou une fonction : matériau isolant, matériau de couverture... ».

Enfin un composant est dit intégré lorsqu'il est mis en œuvre dans un ouvrage, un bâtiment et qu'il devient un élément à part entière de ce bâtiment, ayant dès lors un impact sur le bâtiment et ses objectifs de performances à atteindre

II. Distinguer les composants de construction

La Commission Prévention Produits mis en œuvre (C2P) de l'Agence Qualité Construction propose sur la Figure 6 une distinction des composants de construction de deux types : domaine traditionnel et non traditionnel d'une part et techniques courantes et non courantes d'autre part.

Les composants du domaine traditionnel sont ceux soumis aux Règles de l'Art, autrement dit qui relèvent des :

- Normes Françaises Documents Techniques Unifiés (DTU) : Normes d'exécution ou de mise en œuvre homologuées normes françaises. Elles sont classées par ouvrage et d'origine française. [AFNOR, 2016]

- Normes : « Document, établi par un consensus et approuvé par un organisme reconnu, qui fournit, pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou

des caractéristiques, pour des activités ou résultats, garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné » [AFNOR, 2016]

- Règles Professionnelles : « Socle naturel pour la conception des futurs DTU, les règles professionnelles sont éditées par les filières professionnelles soucieuses de formaliser le cadre de leurs métiers. » [AQC, 2017e]. La Commission Prévention Produits (C2P) de l'AQC étudie ces textes en apportant sa vision « sinistralité », et édite la Liste des règles professionnelles acceptées par la C2P. Les textes qui ne sont pas sur cette liste sont par défaut « mis en observation ».

Concernant la distinction technique courante ou non courante, cette distinction est faite pour les assureurs. Généralement, les techniques courantes sont couvertes par les contrats d'assurances, alors que les techniques non courantes nécessitent une déclaration particulière. La Figure 6 montre que les techniques courantes regroupent le domaine traditionnel ainsi que les composants couverts par des :

- Avis TEchnique (ATEc) [CSTB, 2009a] : il s'agit d'un avis sur l'aptitude à l'emploi des composants non soumis au marquage CE en indiquant si le composant répond à la réglementation en vigueur, s'il est apte à l'emploi en œuvre et s'il dispose d'une durabilité en service. Il est attribué par un collège d'experts par domaine appelé Groupes Spécialisés (GS) pour une durée de 2 à 7 ans renouvelable. Il est disponible sur le site du CSTB ;

- Document Technique d'Application (DTA) [CSTB, 2009b] : c'est une forme particulière de l'ATEc dans le cas où le composant relève du marquage CE

- Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEx) [CSTB, 2009a] : il s'agit d'un avis sur l'aptitude à l'emploi des composants nécessitant une expérimentation (contrairement à l'ATEc qui suppose un nombre conséquent de réalisations) en indiquant si le composant répond à la réglementation en vigueur, s'il est apte à l'emploi en œuvre et s'il dispose d'une durabilité en service. Elle est attribuée par un comité d'experts (CSTB, AIMCC, COPREC, UNSFA, FFB) selon les cas pour un chantier spécifique ou pour une durée et un nombre d'applications limité. Elle peut être dupliquée pour des chantiers similaires ;

- Pass' Innovation vert [CSTB, 2009a] : il apporte une première analyse d'un composant pour participer à l'atteinte des objectifs du Grenelle de l'environnement en facilitant la mise sur le marché rapide de composants innovants (entrant dans le champ du Grenelle de l'environnement et non mûr pour l'ATEc) et en permettant leur développement progressif, ainsi que l'acquisition de nouvelles données et expériences pour amener à l'ATEc. Il est attribué par des experts du CSTB ou associés au CSTB pour une durée de 2 ans maximum et n'est pas renouvelable puisqu'il a vocation à mener vers un ATEc.

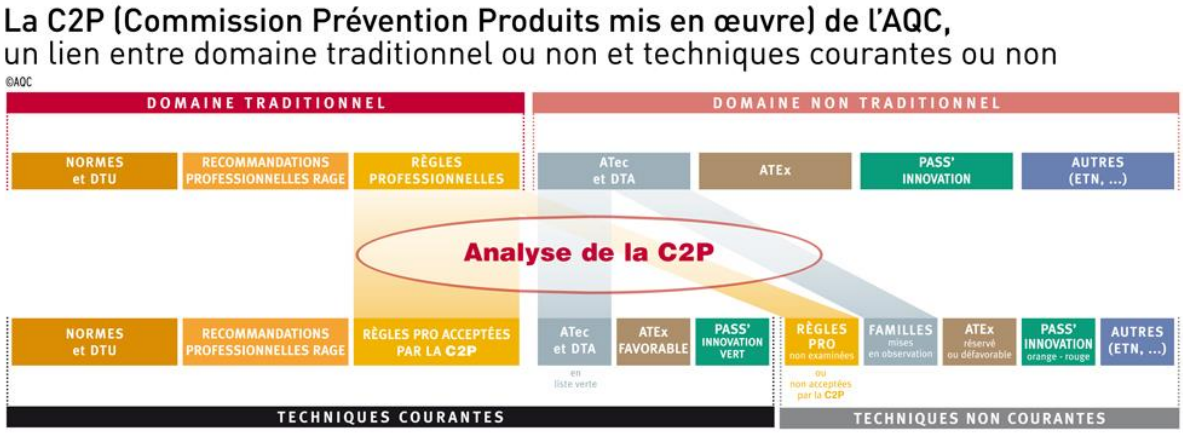


Figure 6 : C2P : un outil d'analyse de risques pour les assureurs construction permettant de distinguer les techniques courantes des techniques non courantes [AQC, 2017e]

Dans le cadre de ce travail de thèse, une des étapes clés est notamment la constitution d'une base de données à partir d'un retour d'expériences étayé et recueilli auprès d'experts. De ce fait la distinction entre domaine traditionnel ou non, et entre technique courante ou non, ne permet pas ni l'une, ni l'autre de fournir une information capitale pour la mise en œuvre de la méthode, à savoir si le composant de construction est largement mis en œuvre et s'il fait l'objet d'un retour d'expériences conséquent et exploitable ou non.

Aussi, il est proposé d'utiliser la distinction entre composant largement diffusé ou composant innovant. Ainsi, est considéré comme :

- Largement diffusé : un composant de construction qui est bien établi dans le domaine de la construction et pour lequel un retour d'expériences conséquent et exploitable existe ;

- Composant innovant : un composant peu mis en œuvre et pour lequel peu ou pas de retour d'expériences est disponible.

III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dans un premier temps défini un composant de construction, notamment en précisant que les composants de construction regroupent les matériaux, les produits et les procédés de construction. Puis nous avons proposé une distinction adéquate des composants de construction dans le cadre de la méthode proposée. D'une part nous avons les composants largement diffusés et pour lesquels souvent un retour d'expériences est disponible ; d'autre part nous avons défini les composants innovants comme étant des composants peu mis en œuvre pour lesquels pas ou peu de retours d'expériences existent.

Dans le chapitre suivant, nous allons décrire chaque étape de la méthode d'évaluation de l'impact de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale du bâtiment sur tout son cycle de vie.

CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE LA METHODE

Le premier chapitre de cette deuxième partie ayant permis de définir et distinguer les composants de construction en deux catégories, largement diffusés et innovants. Ce second chapitre décrit la méthode proposée pour répondre à la problématique

La méthode représentée Figure 7, se décompose en deux processus, l'un si le composant dispose d'un large retour d'expériences, l'autre s'il est innovant. Avant de se diriger vers l'un ou l'autre des processus, un examen préliminaire constitué de deux étapes permet d'une part de fixer les objectifs de performance souhaités pour le bâtiment (étape A Figure 7), d'autre part de savoir quel processus choisir (étape B Figure 7). Ensuite vient, soit le processus principal, soit le processus secondaire. Le processus principal concerne les composants largement diffusés pour lesquels un retour d'expériences est disponible. Il est constitué de 4 étapes numérotées de 1 à 4 sur la Figure 7. Ce processus commence par une identification des couples 'aléa/risque' associés au composant, permettant via un recueil de données auprès d'experts de constituer une base de données afin d'évaluer l'impact du composant aussi bien à l'échelle du composant lui-même qu'à celle du bâtiment. Tandis que le processus secondaire concerne les composants innovants, pour lesquels un retour d'expériences n'est peu ou pas disponible. Ce processus secondaire se décompose en 3 étapes numérotées de I à III sur la Figure 7. Grâce à ce processus les couples 'aléa/risque' associés au composant peuvent être identifiés alors même qu'il n'existe pas ou peu de retour d'expériences pour celui-ci.

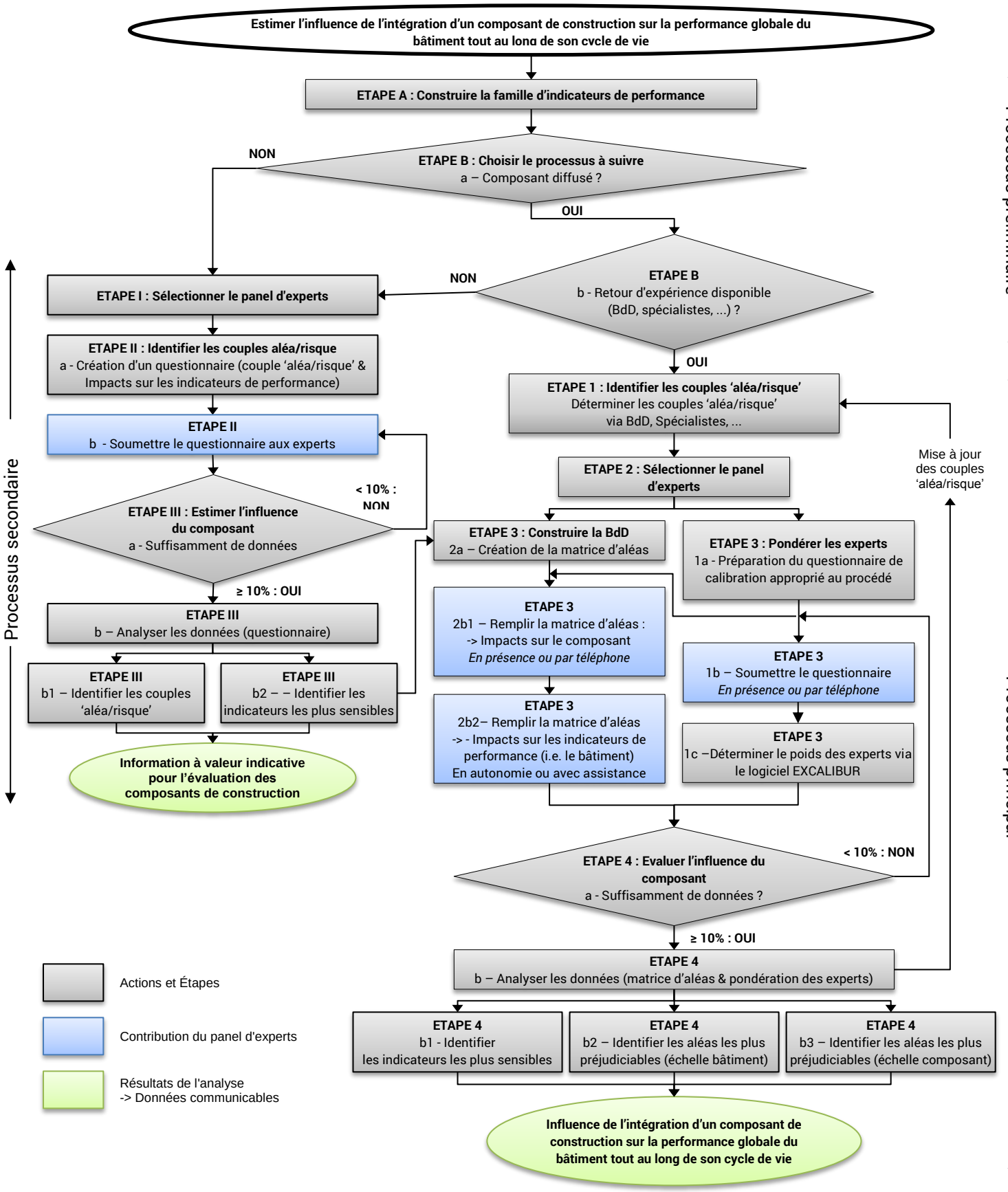


Figure 7 : Méthode d'évaluation de l'impact d'un composant de construction intégré sur la performance globale (environnementale, énergétique, économique et sociale) du bâtiment sur tout son cycle de vie

I. Processus préliminaire

Dans ce paragraphe les deux étapes préliminaires sont décrites. Ce sont deux étapes essentielles pour la suite de la méthode. Dans un premier temps, une famille d'indicateurs de performance représentant la performance globale du bâtiment est proposée, puis un double questionnement permet de sélectionner le processus approprié en fonction du composant étudié.

I.1. Etape A : Construire la famille d'indicateurs de performance

La première étape (*cf.* ETAPE A Figure 7) est commune aux deux processus de la méthode. Il s'agit de créer une famille d'indicateurs de performance permettant de représenter la performance globale du bâtiment.

Construire une famille d'indicateurs de performance, représentant les objectifs souhaités pour obtenir un bâtiment dit performant, permet d'évaluer l'influence des aléas associés à un composant de construction sur chacun de ces indicateurs de performance. Par conséquent l'influence d'un composant sur la performance globale du bâtiment peut être évaluée.

A chacun des indicateurs de performance, une pondération peut être associée en fonction de la performance souhaitée pour le bâtiment à bâtir ou rénover. Grâce à cette pondération l'influence d'un composant et des aléas associés seront évalués au regard d'un bâtiment et des performances qu'il doit atteindre.

Une même échelle pour l'ensemble des indicateurs de performance permet de pouvoir comparer les indicateurs de performance entre eux.

Une proposition de famille d'indicateurs de performance est présentée dans la PARTIE 3 : CHAPITRE 1 : II.

I.2. Etape B : Choisir le processus à suivre

Afin de savoir vers quel processus se diriger, deux questions doivent être posées (*cf.* Etape Ba et Bb - Figure 7).

Premièrement (*cf.* Etape Ba - Figure 7), le composant étudié est-il largement diffusé ? Dans la PARTIE 2 : CHAPITRE 1 : II, la distinction est faite entre un composant largement diffusé et un composant innovant. Aussi si le composant est largement mis en œuvre, la réponse à la question « composant diffusé ? » sera oui.

Si oui, alors deuxièmement (*cf.* Etape Bb - Figure 7), existe-t-il la possibilité de recueillir un retour d'expériences via des bases de données existantes ou des spécialistes du composant en question ?

Si oui, le processus principal est alors choisi.

En revanche, si la réponse à la première et/ou la seconde question est non, le processus secondaire est choisi.

II. Processus principal : Les composants largement diffusés

Ce paragraphe décrit le processus principal de la méthode (*cf.* Etape 1 à 4 - Figure 7). Il concerne les composants largement diffusés.

Dans un premier temps, les couples 'aléa/risque' associés à l'intégration d'un composant de construction sont identifiés sur tout le cycle de vie du bâtiment (PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1). Ce sont ces couples 'aléa/risque' qui ont une influence sur l'atteinte ou non de la performance globale du bâti. Dans une deuxième étape, un panel d'experts est identifié (PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.2). Enfin, dans un troisième temps les experts sont pondérés au regard de leur performance à estimer leur vision de la réalité (PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.3) et les données sont récoltées sur chaque couple 'aléa/risque'. Ces informations permettent *in fine* de créer une base de données pour le composant (PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.4). Ainsi à l'issue de ces trois étapes, l'impact du composant étudié peut être évalué (PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5). Cela afin, d'une part de connaitre les aléas à surveiller, de les anticiper, et dans la mesure du possible de les éviter et d'autre part de connaitre les indicateurs de performance les plus susceptibles d'être dégradés et qui sont donc à surveiller.

II.1. Etape 1 : Identifier les aléas (ou les couples 'aléa/risque') associés au composant intégré

Les couples 'aléa/risque' associés à l'intégration d'un composant de construction sont identifiés (*cf.* Etape 1 - Figure 7) sur tout le cycle de vie du bâtiment puisque ce sont ces couples 'aléa/risque' qui ont une influence sur l'atteinte ou non de la performance globale du bâti et sur le composant de construction lui-même et donc sur sa durabilité notamment.

Pour cela, l'information est d'abord recueillie via des bases de données (notamment dans notre cas d'étude dans la base de données REX BP (Retour d'Expérience dans les Bâtiments Performants) de l'AQC) et/ou par le questionnement de spécialistes du composant étudié. Cela permet ensuite de lister les couples 'aléa/risque', ainsi que le moment où ils interviennent sur le cycle de vie du bâtiment.

Ainsi l'ensemble des informations récoltées pour identifier les couples 'aléa/risque' est synthétisé dans un tableau (*cf.* Tableau 4 ci-dessous). Le tableau permet de recenser les aléas associés à un composant de construction, pour chaque couple 'aléa/risque', la description, ainsi que l'étape du cycle de vie à laquelle l'aléa ou le risque apparait sont mentionnées.

Tableau 4 : Information nécessaire pour identifier les couples 'aléa/risque' (avec un exemple dans le cas des panneaux isolants extérieurs sous enduits)

ALEA		RISQUE	
Description	Cycle de vie	Description	Cycle de vie
Panneaux isolants non joints	*Mise en œuvre*	*Espaces entre les panneaux isolants remplis avec des matériaux inappropriés comme par exemple de l'enduit*	*Mise en œuvre*

A cette liste est ajouté un dernier aléa nommé 'Aléas non prévus'. Cet aléa permet de prendre en compte l'incertain (*cf.* PARTIE 1 : CHAPITRE 1 : II). En effet, l'ensemble des aléas recensés via des bases de données et des spécialistes constitue rarement la liste complète et absolue des couples 'aléa/risque' rencontrés lors de l'intégration du composant étudié dans un ouvrage. et ce pour deux raisons :

- D'une part parce que rien n'est certain et qu'il reste toujours des zones d'ombre, une part d'incertain qui ne peut pas être déterminée avec exactitude mais qui peut être au moins dans une certaine mesure prise en compte ;
- D'autre part parce qu'identifier une liste exhaustive et complète des couples 'aléa/risque' serait une tâche bien trop longue et laborieuse ; en outre irréalisable du fait de la raison sus-mentionnée.

Ainsi l'aléa 'Aléas non prévus' permet de prendre en compte l'ensemble des aléas qui apparaissent comme soit l'une ou plusieurs de ces possibilités :

- Non significatif ;
- Non récurrent ;
- Non identifié ;
- Oublié.

Puisque ces aléas existent, il apparaît alors primordial de les prendre en compte et de les intégrer à la liste des couples 'aléa/risque'. Cela permet d'une part de ne pas les laisser de côté et donc de prendre en compte d'une certaine manière l'incertain puisqu'il existe mais qu'il ne peut pas être connu dans son intégralité. D'autre part de permettre aux experts qui contribuent par la suite au recueil de données de penser aux couples 'aléa/risque' non listés qu'ils ont pu rencontrer pour un composant donné et ainsi de faire ressortir ceux qu'ils

estiment nécessaire de prendre en compte en tant que couple 'aléa/risque' à part entière et non pas dans la catégorie 'aléas non prévus'. Enfin cela permet d'estimer l'influence que peut avoir la part d'incertitude sur le composant de construction au regard de la performance globale de l'ouvrage.

Une fois que la liste des couples 'aléa/risque' est recueillie pour le composant étudié, il s'agit alors de recueillir les données permettant d'évaluer l'impact du composant sur la performance globale. Ce recueil de données se fait via la participation de plusieurs experts qui vont répondre à des questions « cibles » préalablement établies. Les questions « cibles » sont les questions relatives aux variables d'intérêts (*cf.* PARTIE 1 : CHAPITRE 1). Cela nécessite préalablement de sélectionner le panel d'experts qui contribue à cette étape de recueil de données.

II.2. Etape 2 : Sélectionner le panel d'experts

Pour recueillir les données, un panel d'experts est sélectionné (*cf.* Etape 2 - Figure 7), puisque pour le moment ces données ne sont pas recueillies de manière systématique et obligatoire pour chaque bâtiment construit ou rénové [Burgman, 2016][13]. Afin que le panel soit représentatif des métiers du bâtiment et ce tout au long du cycle de vie du bâtiment, les experts retenus sont soit :

- Des spécialistes du composant étudié ;
- Des professionnels ayant une vision globale et travaillant sur des projets de construction intégrant le composant étudié.

En effet, le choix de constituer un panel d'experts et non de prendre un unique expert permet d'augmenter la précision de l'information souhaitée[14]. En outre, choisir des experts ayant des métiers différents, des points de vue différents, des objectifs différents, des expériences différentes permet de varier les sources d'informations, d'éviter des biais cognitifs identiques partagés entre les experts[15] et d'avoir des données agrégées les plus justes et précises possible[16].

---

[13] [Burgman, 2016] « I have argued that there are circumstances where we should afford more weight to data and statistical models. But such tools may not be available. In their absence, expert opinion is unavoidable. ». p 25

[14] Ibid. « Group estimates of facts are generally more accurate than individual estimates. » p 118

[15] Ibid. « Ideally, expert groups should be as diverse as possible, and systems for engagement should encourage people to listen and integrate information and reasoning from as many sources as possible, and to explore competing explanations. The basic idea is that groups made up of individuals with diverse experiences, backgrounds and contexts will draw on different sources of information, form independent initial estimates and avoid shared professional myopia. They will not anchor on common points nor be motivated by common points nor be motivated by common personal goals » p 121

[16] Ibid. « Group diversity generates relatively accurate and well-calibrated answers » p 131

Aussi, la multiplicité des experts intervenant lors de différentes étapes du cycle de vie et ayant des métiers, qualifications et champs d'expertises représentatifs de l'ensemble des ramifications du système complexe qu'est un bâtiment permet de renforcer l'approche systémique adoptée dans cette méthode.

En outre, pour s'assurer de l'exactitude et de la précision de l'information recueillie auprès de ce panel d'experts, une étape permettant d'évaluer la capacité des experts à juger, estimer, évaluer la réalité est nécessaire, il s'agit de la pondération.

II.3. Etape 3-1 : Pondérer les jugements des experts

Afin de connaitre la capacité de chaque expert à donner une information précise statistiquement et ayant un bon caractère informatif, une étape de contrôle de la qualité de l'information et de calibration des experts a été mise en œuvre (*cf.* Etape 3-1 - Figure 7). Cela permet d'optimiser la combinaison des informations recueillies notamment sous forme de distribution de probabilités estimées par les experts, et ce au regard de leur justesse statistique et de leur caractère informatif, autrement dit de leur performance à estimer des distributions de probabilités. En outre, cela permet de combiner les dire d'experts de manière optimisée.

La méthode choisie est le modèle classique (Cf. PARTIE 1 : CHAPITRE 4 : IV) de Cooke (1991), un modèle éprouvé dans différents domaines, tels que le nucléaire, l'industrie chimique, les risques naturels, l'aérospatiale, l'aviation, la santé ou encore la banque par exemple [Goossens, 2007]. La procédure de jugement d'expert structuré EXCALIBUR (*cf.* PARTIE 1 : CHAPITRE 3 : V) est choisie pour l'appliquer.

Dans un premier temps, un questionnaire est créé (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.3.a) puis il est soumis au panel d'experts (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.3.b). Enfin les pondérations de chacun des experts sont déterminées (PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.3.c)

a. Préparer le questionnaire de calibration des experts

Un questionnaire est créé au préalable (*cf.* Etape 3-1a - Figure 7) en s'assurant que les questions de calibration reflètent les sujets étudiés et font sens au regard des données attendues (à travers les questions « cibles ») pour le recueil d'information pour chaque aléa. Les réponses à ces questions sont connues. En outre, les questions doivent être les plus claires et explicites possible et sans aucune ambiguïtés.

Au préalable du questionnaire, une explication (*cf.* Figure 8) est donnée aux experts, afin qu'ils comprennent qu'ils sont évalués au regard de leur capacité à évaluer la réalité et non au regard de leurs connaissances dans le domaine.

Ces questions calibrent la « justesse/précision statistique » de chaque expert et la « valeur informative » ; qui sont combinées en un score représentant une pondération relative permettant d'agréger les valeurs évaluées pour les variables d'intérêts[17].

Pour toutes les questions, merci de fournir votre « plage vraisemblable » d'incertitude (seuil inférieur : 5 % / seuil supérieur : 95 %), votre « meilleure » estimation ou jugement (50 %), ainsi que les valeurs « intermédiaires » (intermédiaire inférieure : 25 % et intermédiaire supérieure : 75 %).

La plage vraisemblable représente la plage dans laquelle vous pensez qu'il y a une probabilité de 90 % que la réponse « correcte » se trouve dans cette plage. Pour cela vous devrait indiquer, selon votre retour d'expériences, la valeur la plus basse (seuil inférieur) et la plus élevée (seuil supérieur) qui encadrent la réponse « correcte » (c.-à-d. qu'il y a seulement une probabilité de 5 % que la valeur soit plus basse que votre seuil inférieur, et une probabilité de seulement 5 % qu'elle soit plus haute que votre seuil supérieur).

Votre « meilleure » estimation devrait être la valeur médiane (50e centile) de la distribution. La forme de distribution ne doit pas nécessairement être symétrique par rapport à la médiane.

Enfin les valeurs « intermédiaires » inférieure et supérieure sont contenues d'une part entre le seuil inférieur et votre « meilleure » estimation et d'autre part entre votre « meilleure » estimation et le seuil supérieur. Pour chacun des cas, quel est selon vous la valeur la plus vraisemblable entre les deux valeurs qui l'encadrent. Pour la valeur intermédiaire inférieure, pour quelle valeur la plus vraisemblable existe-t-il une probabilité de 20 % que la valeur exacte soit entre votre seuil inférieur et votre valeur la plus vraisemblable et une probabilité de 25 % que la valeur exacte soit entre votre valeur la plus vraisemblable et votre « meilleure » estimation ? Pour la valeur intermédiaire supérieure, pour quelle valeur la plus vraisemblable existe-t-il une probabilité de 25 % que la valeur exacte soit entre votre « meilleure » estimation et votre valeur la plus vraisemblable et une probabilité de 20 % que la valeur exacte soit entre votre valeur la plus vraisemblable et votre seuil supérieur ?

En outre la forme de distribution ne doit pas nécessairement être symétrique par rapport aux valeurs intermédiaires.

Figure 8 : Explication préalable au questionnaire de calibration des experts

[17] Les variables qui nous intéressent et qui permettent de compléter la matrice d'aléas.

Ci-dessous, dans le Tableau 5 un exemple de questions proposées pour le questionnaire de calibration.

Tableau 5 : Exemples de questions formulées dans le questionnaire de calibration, ainsi que le type de réponse attendue

Réponses demandées pour les quantiles	5	25	50	75	95
Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (système fixé mécaniquement) ayant fait l'objet d'une déclaration de sinistre à caractère décennal (2006 - 2015), sur 100 ouvrages de type résidentiel, quel est le pourcentage (%) de sinistre de type décollement de l'enduit ?	$r1_{5}\%$	$r1_{25}\%$	$r1_{50}\%$	$r1_{75}\%$	$r1_{95}\%$
Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur (tout système confondu, sous enduit sur isolant et en bardage sur isolant) en France, sur 100 applicateurs/poseurs, en 2015, quel est le pourcentage (%) n'ayant pas suivi de formation spécifique à l'isolation thermique par l'extérieur ?	$r2_{5}\%$	$r2_{25}\%$	$r2_{50}\%$	$r2_{75}\%$	$r2_{95}\%$

Les réponses attendues à chaque question de calibration sont données pour les quantiles 25 %, 50 %, 75 %. Cependant nous préconisons fortement d'élargir les réponses pour les quantiles 5 % et 95 % comme suggéré par le modèle classique de Cooke (1991), puisque d'une part cela n'augmente pas de manière significative le temps de réponse et d'autre part cela permet d'établir une évaluation plus précise de la capacité des experts à estimer.

Les réponses de l'expert sont obtenues de la manière suivante :

1. L'expert donne sa « meilleure » estimation : la valeur $r_{50\%}$ correspondant au quantile 50 % ;

2. L'expert donne ensuite son seuil inférieur, la valeur en dessous de laquelle il pense que la valeur « correcte » à une probabilité de 5 % ou moins de tomber : il s'agit de la valeur $r_{5\%}$ correspondant au quantile 5 % ;

3. L'expert donne également son seuil supérieur, la valeur au-dessus de laquelle il pense que la valeur « correcte » à une probabilité de 5 % ou moins de tomber : il s'agit de la valeur $r_{95\%}$ correspondant au quantile 95 % ;

4. Puis l'expert donne sa valeur intermédiaire inférieure comprise entre son seuil inférieur ($r_{5\%}$) et sa « meilleure » estimation ($r_{50\%}$) et pour laquelle il y a une probabilité de 20 % que la valeur « correcte » soit comprise entre son seuil inférieur et cette valeur intermédiaire inférieure et une probabilité de 25 % qu'elle soit comprise entre cette valeur intermédiaire supérieure et la « meilleure » estimation : il s'agit de la valeur $r_{25\%}$ correspondant au quantile 25 % ;

5. L'expert donne ensuite sa valeur intermédiaire supérieure comprise entre sa « meilleure » estimation ($r_{50\%}$) et son seuil supérieur ($r_{95\%}$) et pour laquelle il y a une probabilité de 25 % que la valeur « correcte » soit comprise entre sa « meilleure » estimation et cette valeur intermédiaire supérieure et une probabilité de 20 % qu'elle soit comprise entre cette valeur intermédiaire supérieure et son seuil supérieur : il s'agit de la valeur $r_{75\%}$ correspondant au quantile 75 %.

La réponse donnée pour le quantile 25 par exemple signifie que la probabilité subjective donnée par l'expert est de 0,25 pour l'événement (si nous prenons l'exemple de la première question du Tableau 5) « Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (système fixé mécaniquement) ayant fait l'objet d'une déclaration de sinistre à caractère décennal (2006 - 2015), sur 100 ouvrages de type résidentiel, $r1_{25}\%$ ou moins ont subi un sinistre de type décollement de l'enduit ». Ainsi une fonction de répartition subjective de la quantité estimée est obtenue (*cf.* PARTIE 1 : CHAPITRE 3 : II).

b. Contribution des experts au questionnaire de calibration

Les experts contribuent au regard de leurs expériences (*cf.* Etape 3-1b - Figure 7). Cette étape se fait soit :

- En face à face lors d'un entretien avec une personne formée afin de récolter l'information sans influencer les réponses venant de l'expert par la manière de poser les questions notamment ;

- Par un entretien téléphonique et prenant les mêmes précautions que précédemment.

Aspinall (2008) recense un certain nombre de réponses aux remarques typiques qu'un expert pourrait avoir lors de leur contribution.

c. Déterminer le poids de chaque expert

Une fois le questionnaire de calibration soumis aux experts, les informations sont implémentées dans le logiciel EXCALIBUR (*cf.* ETAPE 3-1c - Figure 7), afin de déterminer le poids de chacun des experts. Plus leur poids est élevé et plus leur capacité à estimer de manière performante des distributions de probabilité est bonne.

En parallèle de cette étape 3-1, une autre étape où le panel d'experts est sollicité est l'étape 3-2 qui se déroule simultanément avec cette étape. L'étape 3-2 permet de récolter l'information afin de construire la base de données qui est par la suite exploitée.

II.4. Etape 3-2 : Construire la base de données 'aléa/impact' du composant

a. Création de la matrice d'aléas

Simultanément à l'étape de pondération des experts au regard de leur performance, les données sur chaque couple 'aléa/risque' sont recueillies (*cf.* Etape 3 - Figure 7). Cette

information permet de créer une base de données pour estimer l'influence du composant étudié sur la performance globale du bâtiment.

Tout d'abord, une matrice d'aléas est créée (*cf.* Etape 3-2a - Figure 7 et *cf.* Tableau 6), afin de systématiser la contribution des experts. Cette matrice constitue un support organisé, permettant de recueillir l'information nécessaire pour constituer les bases de données « composant » qui sont par la suite exploitées, notamment pour évaluer l'impact du composant sur la performance globale du bâtiment sur tout son cycle de vie.

En complément des informations préalablement récoltées (aléa, risque et moment où ils occurrent sur le cycle de vie du bâtiment) lors de l'étape d'identification des couples 'aléa/risque' (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1), sont récoltées dans la matrice d'aléas les informations suivantes (*cf.* Tableau 6) :

- Nombre de projets sur lesquels l'expert a travaillé intégrant le composant : permet de donner un poids à chaque expert au regard de son expérience avec le composant étudié, afin de le comparer au poids de chaque expert obtenu par la pondération des experts (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.3) ;

- Période incluant l'ensemble de ces projets : information à titre indicatif ;

- Impact du couple 'aléa/risque' sur le composant lui-même via une distribution de probabilités (sur une échelle relative de 0 à 100%) : Pour chaque aléa, est demandé la distribution de probabilités des conséquences de chacun des aléas sur le composant (de la même manière que pour le questionnaire de calibration, i.e. pour les quantiles 25 %, 50 %, 75 % avec une forte préconisation de récolter les réponses pour les quantiles 5 % et 95 % comme suggéré précédemment). Les distributions de probabilités permettent d'estimer la fréquence cumulée des conséquences négatives de l'aléa sur la surface par exemple du composant étudié (échelle relative en %) et ce sur l'ensemble des projets sur lesquels l'expert a travaillé où le composant étudié est intégré. Afin de récolter l'information de la manière la moins biaisée possible, le système de questionnement des experts a été créé suite à plusieurs discussions avec Claude, ayant une expertise sur le management des risques (*cf.* Annexe C). Cette information permet de déterminer la fréquence cumulative de l'impact négatif de chaque aléa sur le composant lui-même et ainsi d'obtenir une information à l'échelle du composant. Le choix s'est porté sur une distribution de probabilités puisque d'une part cela permet de tenir compte des extrêmes [Claude, 2016], d'autre part d'obtenir l'impact du couple 'aléa/risque' au regard de la fréquence.

- Impact du couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance : Cette information est obtenue en fonction de l'échelle ordinale associée à chacun des indicateurs de performances (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : I.1). Pour chaque impact de chacun des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performances, l'impact est demandé pour :

- Le cas le moins préjudiciable rencontré pour l'indicateur : min ;
- Le cas le plus préjudiciable rencontré pour l'indicateur : max.

Ce qui donne une fourchette d'impact potentiel de chaque couple 'aléa/risque' sur les indicateurs de performances et non une moyenne qui serait difficilement estimable par les experts et beaucoup moins exploitable. Cependant au regard de l'exploitation des résultats présentée plus loin dans le manuscrit (*cf.* PARTIE 3), est préconisé de plutôt utiliser le même système de questionnement par quantiles (5, 25, 50, 75, 95 %) pour obtenir une fréquence cumulative de l'impact de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance. Ainsi pour chaque quantile demandé, l'expert associe un pourcentage de dégradation de l'indicateur de performance par le couple 'aléa/risque'. D'une part cela permet d'avoir une information plus complète et plus exploitable et d'autre part de pouvoir comparer l'impact à l'échelle composant et à l'échelle du bâtiment[18] et tirer plus d'informations de la base de données.

Cela permet d'évaluer l'influence des couples 'aléa/risque' à l'échelle du bâtiment et donc de savoir comment chaque couple 'aléa/risque' va influencer la performance globale, i.e. lesquels sont les préjudiciables et de quelle manière pour la performance globale. Cela permet également d'évaluer la sensibilité de chaque indicateur de performance au regard du composant et donc de déterminer lesquels sont dégradés. Ainsi, cela donne une information sur la manière dont la performance globale est dégradée.

- Conséquences des couples 'aléa/risque' couplées au moment où ils peuvent apparaitre sur le cycle de vie : C'est une manière d'expliciter l'impact des couples 'aléa/risque' sur le bâtiment et donc sur sa performance globale ;
- Bonnes pratiques suggérées (facultatif) : Cette information peut être proposée par l'expert afin de rendre l'information disponible et de relayer des bonnes pratiques dans la base de données pour une future exploitation comme règles expertes intégrées dans le BIM notamment ou pour des acteurs de la construction comme l'AQC ou les fédérations du bâtiment dans une démarche d'amélioration et de qualité continue (*cf.* PARTIE 3 : CHAPITRE 4 : ci-dessous)

La matrice d'aléas se présente alors sous cette forme :

[18] Ce qui n'est actuellement pas possible car les résultats nesont pas obtenus sur les mêmes échelles.

Tableau 6 : Organisation de la matrice d'aléas pour un composant de construction (avec un exemple de remplissage par un expert pour un couple 'aléa/risque')

Aléa	Description	*Panneaux isolants non joints*	
	Cycle de vie	*Mise en œuvre*	
Risque	Description	*Espaces entre les panneaux isolants remplis avec des matériaux inappropriés comme par exemple de l'enduit*	
	Cycle de vie	*Mise en œuvre*	
Nombre de projets sur lesquels vous avez travaillé intégrant le composant		*10*	
La période incluant l'ensemble de ces projets		*D'avril 2012 à juin 2016 - 4 ans*	
Impact du couple 'aléa/risque' sur le composant lui-même via une distribution de probabilités cumulative (sur une échelle relative de 0 à 100%)		5%	Préconisé
		25%	*3%*
		50%	*10%*
		75%	*20%*
		95%	Préconisé
Impact du couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance pour les cas les moins et plus préjudiciables rencontrés pour l'indicateur (sur une échelle de 0 à 5) – PRECONISATION : Estimer plutôt l'impact via une distribution de probabilités cumulative (sur une échelle relative de 0 à 100 %)		min	*max*
	Confort acoustique	1	*2*
	…	…	…
	Performance thermique de l'enveloppe	2	*4*
Conséquences	Description	*Ponts thermiques menant à une perte de performance énergétique et à l'inconfort des utilisateurs*	
	Cycle de vie	*Mise en œuvre / Mise en service / Exploitation*	
Bonnes pratiques suggérées	Description	*Formation spécifique des opérateurs*	
	Cycle de vie	*En amont de la Mise en œuvre*	

b. Contribution des experts à la matrice d'aléas

Dans un second temps, les experts contribuent à la matrice d'aléas en la renseignant au regard de leurs expériences avec le composant étudié (*cf.* Etape 3-2b - Figure 7). Cette étape peut être décomposée en l'étape 3-2b1 et 3-2b2 (*cf.* Figure 7) et se faire de différentes manières :

- En face à face lors d'un entretien avec une personne formée afin de récolter l'information sans influencer les réponses venant de l'expert aussi bien par la manière de poser les questions, que par la manière de les renseigner dans la matrice d'aléas (étape 3-2b1 et 3-2b2) ;

- Par un entretien téléphonique et prenant les mêmes précautions que précédemment (étape 3-2b1 et 3-2b2) ;

- L'expert répond seul à la matrice d'aléas et peut bénéficier d'une assistance téléphonique pour répondre aux questions qu'il se pose tant que les réponses n'influent pas sur la récolte d'information auprès de l'expert (étape 3-2b2 seulement).

Ces précautions sont là pour éviter au mieux les ambigüités et biais, aussi bien du côté de l'expert que de la personne en charge de récolter les données. Elles sont importantes à prendre pour préserver au mieux l'information récoltée et la rendre la moins entachée de biais possible dans un souci de correspondre au mieux à la réalité.

A l'issue de ces différentes étapes, la dernière partie du processus principal permet de déterminer l'impact du composant étudié.

II.5. Etape 4 : Evaluer l'impact du composant intégré sur la performance globale du bâtiment

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer s'il y a suffisamment de recueil de données (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.a), afin d'analyser les données (PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.b) pour ensuite évaluer trois types d'informations :

- Les indicateurs les plus à même d'être dégradés par l'intégration du composant (*cf.* Etape 4c - Figure 7 - PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.d) ;

- Les aléas ayant les impacts les plus préjudiciables à l'échelle du bâtiment (*cf.* Etape 4d - Figure 7 - PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.e) ;

- Les aléas ayant les impacts les plus préjudiciables à l'échelle du composant (*cf.* Etape 4e - Figure 7 - PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.e).

L'ensemble de ces informations permet ainsi d'évaluer l'influence d'un composant intégré sur la performance globale du bâtiment et ce sur l'ensemble de son cycle de vie. Il s'agit bien ici d'une évaluation basée sur un recueil de données subjectives et bien qu'un ensemble de précaution soit pris pour éviter au mieux les biais et rendre ces données les plus proches de la réalité possible, elles sont dans tous les cas à prendre avec précaution et à interpréter et analyser avec un œil critique.

a. Le recueil de données est-il suffisant ?

Analyser des données n'a de sens qu'à partir du moment où le nombre de données, issues du recueil de données est suffisamment riche pour que l'information recueillie via l'analyse soit raisonnable (*cf.* Etape 4a - Figure 7). Dans le cas de ce doctorat, entre 70 et 80 personnes ont été contactées pour participer à l'expérimentation de la méthode comme expert. De par la difficulté de mobiliser des professionnels de la construction pour une expérimentation dans une problématique assez récente, il a été choisi d'avoir environ 10 % des personnes contactées pour participer à l'expérimentation, afin d'analyser les données.

Il est incontestable que plus le nombre d'experts participant à l'étude d'un composant est grand et plus l'analyse de données est pertinente et riche d'informations. Il s'agit ici d'une expérimentation à petite échelle, et il est important de ne pas oublier cela lors de la lecture des résultats en PARTIE 3.

b. Analyse des données

Les différents outils utilisés pour analyser les données (*cf.* Etape 4b - Figure 7) sont présentés dans les paragraphes ci-dessous et décrits dans l'Annexe B.

Cependant il est nécessaire de préciser, que les données sont pondérées, afin de comparer l'influence des pondérations sur les données entre elles. Les pondérations sont soit :

- Équiprobables, afin de comparer les résultats obtenus avec pondération et sans ;
- Pondérées en fonction de chaque expert au regard de leur performance à exprimer un jugement (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.3) ;
- Pondérées au regard de l'expérience de chaque expert, en ramenant le nombre de projets avec le composant étudié rencontrés par l'expert au nombre total de projets avec le composant étudié rencontrés par le panel d'experts donc par l'ensemble des experts.

Ainsi les données qui sont analysées par la suite sont les données pondérées donc multipliées par l'une ou l'autre des pondérations présentées ci-dessus.

De plus, les indicateurs de performance de la famille d'indicateurs de performance peuvent également être pondérés (pour correspondre à un projet de construction particulier par exemple ou répondre à des attentes de certifications de type Haute Qualité Environnementale (HQE)). Ainsi, selon les pondérations choisies pour les indicateurs de la famille de performance, les aléas les plus préjudiciables (à l'échelle bâtiment et composant), ainsi que les indicateurs les plus sensibles ne seront pas nécessairement identiques mais évolueront au regard des pondérations allouées à chaque indicateur de performance (*cf.* PARTIE 3 : CHAPITRE 4 : I.1.a).

Enfin, l'identification des indicateurs les plus sensibles aux couples 'aléa/risque' et des couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables à l'échelle du bâtiment se fait sur (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.4.a) :

- Le cas le moins préjudiciable rencontré pour l'indicateur : min ;

- Le cas le plus préjudiciable rencontré pour l'indicateur : max.

c. *Identification des indicateurs les plus sensibles aux couples 'aléa/risque'*

Pour déterminer les indicateurs les plus à même d'être dégradés (*cf.* Etape 4b1 - Figure 7), l'analyse est faite à partir de l'impact de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance. Une analyse de données utilisant la médiane et son intervalle de confiance, outils d'analyse de statistique descriptive (*cf.* Résumés numériques des données – Annexe B), est utilisée. Bien que les statistiques soient difficilement significatives et que les données ont plus une valeur « qualitative » que « quantitative » quand il y a peu de données i.e. dans notre cas peu d'experts, il est tout de même nécessaire d'analyser ces données. Le choix s'est porté sur un indicateur de centralité, puisque il s'agit de résumer les données fournies par les experts pour obtenir un expert fictif unique. L'échelle utilisée pour les indicateurs de performance est ordinale, donc la médiane est l'indicateur de centralité à privilégier.

Afin de voir l'influence des valeurs extrêmes sur la médiane, il est également choisi de calculer pour chaque indicateur :

- La valeur de la médiane lorsque la valeur minimum (donnée par les experts pour l'impact du couple 'aléa/risque' sur l'indicateur de performance) est écartée ;

- La valeur de la médiane lorsque la valeur maximum est écartée.

Cela permet d'une part de vérifier que les valeurs extrêmes n'influencent pas la médiane de manière exagérée, et par conséquent qu'utiliser cet indicateur comme outil d'analyse statistique est fiable, puisque la médiane n'est pas censée être influencée par les valeurs extrêmes. D'autre part, cela permet de déterminer s'il y a des valeurs très extrêmes et de revenir vers l'expert pour avoir plus de détails concernant le choix de cette valeur.

En revanche, utiliser la médiane comme indicateur central d'analyse de données peut poser problème si ils existent des valeurs extrêmes qui n'ont pas d'impact significatif sur la médiane mais qui peuvent malgré tout être source d'information pertinente.

Pour chaque expert, la somme des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance est calculée.

Ci-dessous l'organisation du tableau de données pour l'analyse :

Tableau 7 : Organisation des données pour l'identification des indicateurs les plus sensibles

	Min (cas le moins préjudiciable rencontré par l'expert)			Max (cas le plus préjudiciable)			Médiane		Médiane sans la valeur extrême supérieure		Médiane sans la valeur extrême inférieure	
	Expert 1	Expert i	Expert n	Expert 1	Expert i	Expert n	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Indicateur 1												
Indicateur j	Somme pour chaque expert des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance											
Indicateur m												

d. Identification des couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables pour la performance globale – échelle du bâtiment

Pour évaluer les aléas ayant les impacts les plus préjudiciables à l'échelle du bâtiment (*cf.* Etape 4b2 - Figure 7) et donc sur la performance globale, les impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance sont de nouveaux analysés. Pour les mêmes raisons que dans le paragraphe précédent, le choix s'est porté sur l'utilisation de la médiane et ce dans les mêmes conditions.

Pour chaque expert, la somme des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance est calculée pour chaque aléa.

Ci-dessous l'organisation du tableau de données pour l'analyse :

Tableau 8 : Organisation des données pour l'identification des aléas les plus préjudiciables

	Min (cas le moins préjudiciable rencontrés par l'expert)			Max (cas le plus préjudiciable)			Médiane		Médiane sans la valeur extrême supérieure		Médiane sans la valeur extrême inférieure	
	Expert 1	Expert i	Expert n	Expert 1	Expert i	Expert n	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Aléa 1												
Aléa j	Somme pour chaque expert et pour chaque aléa des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance											
Aléa m												

e. *Identification des couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables pour la performance globale – échelle du composant*

Pour évaluer les aléas ayant les impacts les plus préjudiciables à l'échelle du composant (*cf.* Etape 4b3 - Figure 7), ce sont les distributions de probabilités, permettant de déterminer une fréquence cumulative de la surface dégradée par le couple 'aléa/risque', qui sont analysées.

Pour chaque couple 'aléa/risque', les distributions de probabilités de l'ensemble des experts sont combinées par l'une des trois pondérations (équiprobable, poids de l'expert issus de la pondération par rapport à leur performance à exprimer un jugement, poids au regard de l'expérience de l'expert - *cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.b) grâce au logiciel EXCALIBUR (*cf.* PARTIE 1 : CHAPITRE 3 : V), afin d'obtenir une distribution de probabilités unique par couple 'aléa/risque'.

Ainsi identifier les couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables pour la performance globale à l'échelle du composant peut se faire par exemple pour une fréquence cumulée de 90 %. Si la valeur obtenue via la loi de probabilités est 80 % alors cela signifie que :

- Dans 90 % des cas, au plus 80 % du composant est dégradé par le couple 'aléa/risque' ;
- 80 % est l'un des cas les plus défavorables.

III. Processus secondaire : les composants innovants

Le processus secondaire (*cf.* Etape I à III - Figure 7) est un processus proposé pour les composants innovants pour lesquels ils existent peu ou pas de retour d'expériences, faute de mise en œuvre du composant.

Ce processus mène à deux types d'information :

- Identifier une liste de couples 'aléa/risque', d'une part a priori et d'autre part basée sur le peu d'expérience acquise d'expérimentation ou de rares mises en œuvre déjà réalisées ;
- Estimer a priori les impacts des couples 'aléa/risque' sur la performance globale du bâtiment via les indicateurs de performance.

Encore une fois un panel d'experts (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : III.1) est la clef de voûte pour obtenir cet ensemble d'informations permettant :

- D'une part lorsque le composant est de plus en plus diffusé de passer au processus principal grâce à l'identification des couples 'aléa/risque' (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : III.2) réalisée via le processus secondaire,
- D'autre part d'avoir une information à titre indicatif sur l'impact que ces couples 'aléa/risque' peuvent avoir sur la performance globale (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : III.3).

III.1. Etape I : Sélectionner le panel d'experts

De la même manière que pour le processus principal, le panel d'experts nécessite d'être sélectionné au préalable (*cf.* Etape I - Figure 7). Ce sont les mêmes consignes que pour le processus principal (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.2).

III.2. Etape II : Identifier les couples 'aléa/risque'

Pour identifier les couples 'aléa/risque', contrairement au processus principal où l'identification des couples 'aléa/risque' est rendue possible par un large retour d'expériences déjà constitué, il est nécessaire de recourir à un questionnaire (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : III.2.a) auquel les experts contribuent (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : III.2.b).

a. Création d'un questionnaire

Afin de déterminer l'information qui ne peut être obtenue via des bases de données mais seulement via plusieurs spécialistes du domaine, un questionnaire est mis en place (*cf.* Etape IIa - Figure 7).

Ce questionnaire permet de récolter les informations suivantes :

- Aléas couplés au moment où ils peuvent apparaitre sur le cycle de vie du bâtiment : *cf.* processus principal – PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1 ;
- Risques couplés au moment où ils peuvent apparaitre sur le cycle de vie : *cf.* processus principal –PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1 ;
- Nombre de projets sur lesquels l'expert a travaillé intégrant le composant : *cf.* processus principal –PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1 ;
- Période incluant l'ensemble de ces projets : *cf.* processus principal –PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1 ;
- Impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance (*cf.* processus principal – PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.4.a) : Cette information est contrairement au processus principal, une première estimation, souvent a priori, de la part des experts, à valeur indicative, afin de déterminer une première estimation de l'impact des couples 'aléa/risque' sur la performance globale et les indicateurs de performance les plus à même d'être dégradés par ces couples 'aléa/risques.
- Conséquences des couples 'aléa/risque' couplées au moment où elles peuvent apparaitre sur le cycle de vie : *cf.* processus principal –PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1 ;
- Bonnes pratiques suggérées (facultatif) : *cf.* processus principal –PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1.

Contrairement au processus principal, il n'est pas demandé de donner l'impact du couple 'aléa/risque' sur le composant lui-même via une distribution de probabilités, puisque les

experts n'ont pas le recul nécessaire pour l'évaluer car le composant dit innovant n'a été que peu mis en œuvre. De même, il n'est pas préconisé de passer par le système de distribution de probabilités cumulative pour l'impact de chaque couple 'aléa/risque ' sur chaque indicateur de performance pour la même raison.

En outre, dans ce processus, les experts ne sont pas pondérés. En effet, le manque d'information disponible au regard du composant étudié ne permet pas d'établir cette étape. Pour cette raison, il est important de noter que l'information vraiment exploitable ici est celle permettant d'identifier les couples 'aléa/risque' puisque cette liste constitue un point de départ pour démarrer le processus principal lorsque le composant est de plus en plus mis en œuvre et qu'un retour d'expériences commence à exister. En outre, la liste peut évoluer dans le temps. Par ailleurs, les impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance est une information à valeur indicative constituant une première estimation. Dans le Tableau 9 ci-dessous est représenté un exemple de questionnaire.

Tableau 9 : Exemple de questionnaire pour le processus secondaire

Aléa	Description Cycle de vie	
Risque	Description Cycle de vie	
Nombre de projets sur lesquels vous avez travaillé intégrant le composant **La période incluant l'ensemble de ces projets**		
Impact du couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance pour les cas les moins et plus préjudiciables rencontrés pour l'indicateur (sur une échelle de 0 à 5)	**Confort acoustique** … **Performance thermique de l'enveloppe**	min *max*
Conséquences	Description Cycle de vie	
Bonnes pratiques suggérées		

b. Contribution des experts au questionnaire

Une fois le questionnaire créé, le panel d'experts y contribue (*cf.* Etape IIb - Figure 7) de la même manière que pour la matrice d'aléa (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.4.b), soit en face à face ou par téléphone avec une personne formée, soit seul avec une assistance téléphonique si besoin.

Une fois les experts ayant contribué, l'information issue de ces questionnaires est traitée et triée afin d'identifier une première liste de couples 'aléa/risque'. La liste est proposée sous forme de tableau avec les entrées suivantes :

- Identifiant (Id) : ce sont les identifiants de chaque couple 'aléa/risque' ;
- Aléa ;
- Risque ;
- Conséquences : ce sont les conséquences associées au couple 'aléa/risque' ;
- Bonnes pratiques : ce sont les bonnes pratiques proposées par les experts ;
- Nombre de proposition des experts pour identifier ce couple 'aléa/risque' : ce nombre ne peut dépasser le nombre de personnes constituant le panel d'experts puisque chacun propose une fois un couple 'aléa/risque'.

III.3. Etape III : Estimer l'impact du composant intégré

Dans le processus secondaire, l'impact du composant intégré est estimée à partir de l'analyse brute des questionnaires (*cf.* Etape III - Figure 7). A ce titre elle est beaucoup moins fiable que l'estimation obtenue lors du processus principal et est donc à utiliser avec précaution. En effet, les experts estiment l'impact des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performances sur une expérience souvent peu conséquente puisque le composant est innovant. En outre, les experts ne sont pas calibrés, donc leur capacité d'estimer des grandeurs incertaines pour ce type de composant n'est pas déterminée puisque là encore il existe trop peu d'informations sur le composant en question. Aussi cette étape est remise en question dans la PARTIE 3 : CHAPITRE 3.

De la même manière que pour le processus principal (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5), les données issues du questionnaire sont analysées (*cf.* Etape IIIa - Figure 7) afin d'obtenir une estimation des indicateurs de performance les plus sensibles (*cf.* Etape IIIb - Figure 7). Ces données sont obtenues une fois encore grâce à l'utilisation de la médiane, ainsi le détail se trouve dans le processus principal dans la PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.c.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la méthode proposée. Cette méthode permet d'évaluer l'impact de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale d'un bâtiment sur tout son cycle de vie, afin de déterminer si un composant de construction intégré

pour améliorer une ou plusieurs performances du bâtiment ne va pas dégrader une ou plusieurs autres performances, dégradant la performance globale. La méthode s'articule en trois processus, le premier est préliminaire. Il permet dans un premier temps de bien définir la performance globale du bâtiment par la construction d'une famille d'indicateurs de performance représentant les objectifs souhaités à atteindre pour que le bâtiment soit dit performant globalement. Puis dans un second temps de choisir le processus qui sera mis en œuvre au regard de la diffusion du composant de construction étudié. Ensuite, soit le processus principal est mis en œuvre, pour un composant largement diffusé, permettant d'évaluer l'impact du composant grâce aux couples 'aléa/risque' associés sur la performance globale en déterminant les indicateurs les plus susceptibles d'être dégradés et également de déterminer les couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables aussi bien à l'échelle du composant qu'à l'échelle du bâtiment. Puis le dernier processus est le processus secondaire permettant d'identifier les couples 'aléa/risque' associés à un composant innovant alors même que peu, voire pas de retour d'expérience existe pour celui-ci.

Dans cette deuxième partie, nous avons dans un premier chapitre défini ce que nous appelons un composant de construction, puis nous avons proposé une distinction entre les composants largement diffusé et les composants innovants.

Dans un second chapitre nous avons décrit la méthode qui se décompose en trois processus. D'abord, le processus préliminaire qui permet d'une part de définir les objectifs de performance attendus pour un bâtiment et d'autre part de choisir le processus à suivre au regard du type de composant : largement diffusé ou innovant. Puis nous avons décrit le processus principal qui concerne les composants largement diffusés et permet d'évaluer l'impact d'un composant de construction, via les couples 'aléa/risque' qui lui sont associés, sur lui-même (échelle composant) et sur les objectifs de performance du bâtiment (échelle bâtiment), ainsi que les couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables pour la performance globale du bâtiment. Enfin nous avons décrit le processus secondaire qui concerne les composants innovants et permet principalement d'identifier les couples 'aléa/risque' associés à ce composant apportant une première information sur le composant et permettant de préparer le passage au processus principal lorsque le composant est plus largement mis en œuvre.

Dans la troisième et dernière partie de ce manuscrit, nous allons présenter et commenter les résultats obtenus suite à l'expérimentation de la méthode sur un composant largement diffusé, l'isolation par l'extérieur sous enduits et sur un composant innovant, le Panneau Isolant sous Vide. Puis nous allons dégager l'apport de cette méthode au domaine, ensuite faire le bilan de la méthode d'un point de vue théorique d'une part en détaillant les qualités, limites, perspectives et améliorations possibles ; d'un point de vue expérimental d'autre part en détaillant les bonnes pratiques, risques et apprentissages. Enfin nous proposons plusieurs valorisations possibles de la méthode pour les différents acteurs du domaine de la construction.

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

La méthode proposée et détaillée dans la PARTIE 2 a été expérimentée sur deux cas d'étude, pour tester à la fois le processus concernant un composant largement diffusé et le processus concernant un composant innovant. Afin d'éprouver la méthode, il est nécessaire de la confronter à la réalité du domaine et des acteurs de la construction. La thèse étant réalisée au sein d'une équipe travaillant sur les isolants, le choix des cas d'étude s'est naturellement porté sur deux types de composants de construction de la famille isolation. Le choix s'est dès lors porté sur :

- Un procédé largement diffusé, l'isolation thermique par l'extérieur sous enduit, communément appelé ETICS pour External Thermal Insulation Composite System, qui est un procédé pour lequel un grand nombre de retour d'expériences existent déjà ;

- Un produit innovant, le Panneau Isolant sous Vide, communément appelé PIV ou VIP pour Vacuum Insulation Pannel , dont un projet de recherche (ANNEX 65 : Long-Term Performance of Super-Insulation in Building Components & Systems, un projet international de l'International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities (IEA EBC) qui est un programme international réunissant 22 pays membres) est en cours actuellement, auquel j'ai pu contribuer à travers cette thèse et grâce à l'expérimentation de la méthode proposée ici sur ce produit innovant.

Les systèmes d'isolation extérieure sous enduit (ETICS), bien qu'étant soumis à des Règles Professionnelles relatives à leurs entretiens et rénovations [UPPF/SFJF, 2010], ne font pas partis du domaine traditionnel. En effet, les Règles Professionnelles doivent concerner la mise en œuvre pour que ce soit le cas. Contrairement aux panneaux isolants sous vide (PIV) qui ne sont soumis pour l'instant à aucune Règles de l'Art. L'AQC inclut également aux Règles de l'Art (*cf.* Figure 6) les Recommandations Professionnelles « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 (RAGE) » qui ont pour vocation de proposer de nouvelles règles de l'art[19] et dont les ETICS, dans le cas du polystyrène expansé [RAGE, 2014] font l'objet.

Ainsi, concernant les deux procédés retenus pour tester la méthode proposée, le Tableau 10 propose une synthèse de leur positionnement au regard des différentes classifications. Les ETICS et les PIV appartiennent tous les deux au domaine non traditionnel et aux techniques courantes, cependant le premier est mis en œuvre depuis plus de 50 ans [EAE, s.d, b] alors que le second est arrivé récemment sur le marché et fait encore l'objet de recherche (notamment via l'ANNEX 65).

[19] « Sous l'impulsion de la CAPEB et de la FFB, de l'AQC, de la COPREC Construction et du CSTB, les acteurs de la construction se sont rassemblés pour définir collectivement ce programme. Financé dans le cadre du dispositif des certificats d'économies d'énergie grâce à des contributions importantes d'EDF (15 millions d'euros) et de GDF Suez (5 millions d'euros), ce programme vise, en particulier, à mettre à jour les règles de l'art en vigueur aujourd'hui et à en proposer de nouvelles, notamment pour ce qui concerne les travaux de rénovation. Ces nouveaux textes de référence destinés à alimenter le processus normatif classique seront opérationnels et reconnus par les assureurs dès leur approbation ; ils serviront aussi à l'établissement de manuels de formation. » [RAGE, 2014]

Tableau 10 : Distinction domaine traditionnel ou non et technique courante ou non pour les ETICS et les PIV

Composants de construction	Domaine traditionnel	Domaine non traditionnel	Technique courante	Technique non courante	Composant largement diffusé	Composant innovant
ETICS		X	X		X	
PIV		X	X			X

L'ETICS est largement mis en œuvre depuis un certain nombre d'années et notamment depuis 2012, chaque année, environ 12 000 m², sont posés [TBC, 2016]. En outre l'ETICS bénéficie d'un retour d'expériences conséquent et exploitable, dont celui de la base de données REX BP de l'AQC ou encore de spécialistes reconnus du domaine. Il est dès lors dans la catégorie composant largement diffusé. Tandis que le PIV est un composant innovant, puisqu'il est encore peu mis en œuvre et qu'il bénéficie de peu de retour d'expériences capitalisé et donc disponible par des bases de données ou par des professionnels de la construction.

Le premier chapitre présente le procédé largement diffusé ETICS puis les résultats de la méthode appliquée à ce composant dont l'application des processus préliminaire et principal. Le second chapitre concerne la description du produit innovant PIV, ainsi que les résultats de l'application des processus préliminaire et secondaire de la méthode sur ce composant. Dans ces deux chapitres, les résultats sont d'abord présentés et peu commentés, puis dans chacun de ces chapitres, un dernier paragraphe intitulé 'conclusion' propose une synthèse des résultats obtenus ainsi qu'une discussion sur ces résultats. Un troisième chapitre est consacré aux discussions pour enfin proposer dans un dernier chapitre des valorisations possibles de la méthode pour différentes familles d'acteurs de la construction.

CHAPITRE 1 : RESULTATS DU CAS D'ETUDE 'COMPOSANT LARGEMENT DIFFUSE' – ISOLATION THERMIQUE PAR L'EXTERIEUR SOUS ENDUIT (ETICS)

Le premier cas d'étude a été choisi pour deux raisons, c'est un procédé de construction :

- largement diffusé ;
- pour lequel une demande a été clairement identifiée au sein du CSTB d'obtenir des informations sur la performance globale du bâtiment au regard des impacts des aléas liés à ce procédé.

Dans un premier temps, ce procédé de construction est décrit d'un point de vue technique, puis le déroulement de la méthode, processus préliminaire et principal, est exposé avec les résultats associés. Enfin une conclusion sur les résultats obtenus est proposée permettant également de conclure quant à l'expérimentation de la méthode.

I. Principe de l'isolation thermique par l'extérieur sous enduit – ETICS

Le procédé ETICS est décrit techniquement, afin de rendre plus aisée la compréhension des résultats associés.

I.1. L'Isolation Thermique par l'Extérieure - ITE

L'isolation thermique par l'extérieur – ITE – est une protection hygrothermique non porteuse située à l'extérieur des parois opaques verticales d'un bâtiment. Il existe deux filières d'ITE :

- La filière sèche regroupant les systèmes de type bardages rapportés, vêtures, vêtage avec isolation et revêtement attaché en pierre mince ;
- La filière humide regroupant les enduits sur isolant (ETICS), soit mince (EMI Enduit Mince sur Isolant), soit épais (ELI pour Enduit Lourd sur Isolant).

Dans ce manuscrit est seulement décrit l'ETICS.

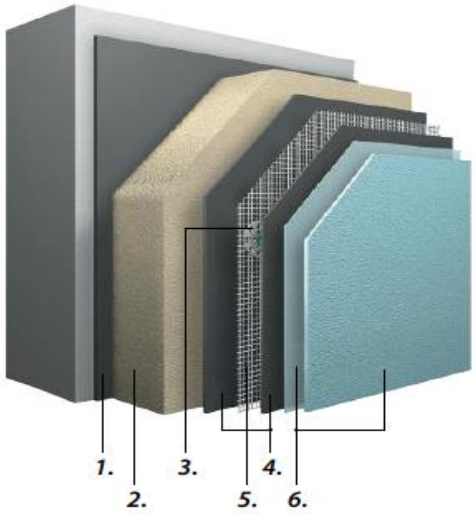
L'ITE dont l'ETICS fait partie est seulement là pour assurer une protection hygrothermique donc une étanchéité à l'eau et une protection thermique, tandis que la paroi assure l'étanchéité à l'air, à l'eau également, la sécurité contre les chutes à travers la façade et enfin la stabilité d'ensemble du bâtiment.

Ce type de procédé est adapté aussi bien aux travaux neufs, qu'en rénovation. L'un des principaux avantages est de réduire fortement les ponts thermiques au niveau des liaisons mur/plancher intermédiaire (pour les cas sans balcon) et mur/refend. En outre, il protège la paroi des sollicitations climatiques. Grâce à une mise en œuvre extérieure, la surface habitable ne subit pas de perte. Dans le cas d'une rénovation, avoir recours à l'ITE au lieu de l'Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI) permet de coupler le ravalement à l'isolation thermique et de minimiser la gêne des occupants si la rénovation se fait en site occupé.

En revanche, pour la mise en œuvre, un échafaudage est nécessaire et elle est tributaire des conditions climatiques. Au niveau des balcons, les ponts thermiques sont toujours existants et l'accessibilité aux balcons, coursives, … peut en être diminuée. La paroi recevant ce type de

procédé doit dans l'idéal être une façade plane, peu percée et de grande taille. Enfin, les points singuliers (balcon, acrotère, angle, départ, joint, encadrement, …) nécessitent une grande attention et des précautions particulières lors de la mise en œuvre.

I.2. External Thermal Insulation Composite System – ETICS



1 - Mortier colle
2 - Isolant
3 - Fixation mécanique de l'isolant
4 - Enduit de base
5 - Treillis d'armature
6 - Enduit de finition

Figure 9 : Ensemble des composants de base constituant un ETICS [EAE, s.d., a]

L'ETICS est un procédé de construction constitué de 6 éléments principaux présentés sur la Figure 9.

Le mortier colle permet de faire adhérer l'isolant au mur support. Des fixations mécaniques peuvent également être utilisées pour fixer l'isolant au mur. Sur l'isolant une couche de base est déposée, permettant la stabilité structurelle et mécanique de l'ETICS. Cette couche est constituée d'une première couche d'enduit de base mince sur laquelle un treillis d'armature est déposé puis une seconde couche d'enduit de base mince est déposée prenant en sandwich le treillis pour le maintenir en place. Enfin un enduit de finition est déposé selon les goûts et préférences du client.

Aux droits des points singuliers (menuiseries, angles, …) des précautions particulières (comme la pose de mouchoirs, couvertines, doublage de l'armature, …) sont à prendre afin d'assurer une tenue structurelle suffisante au regard des sollicitations plus importantes.

II. Résultats – composant largement diffusé : ETICS

Dans cette partie, les résultats relatifs au composant largement diffusé ETICS obtenus suite à l'expérimentation de la méthode sont présentés. Il s'agit dans cette section de présenter à la fois les résultats et la mise en œuvre de la méthode pour obtenir ces résultats. Ici, il s'agit d'une description détaillée des faits et des résultats concernant le déroulement de l'expérimentation de la méthode pour le composant largement diffusé. Dans un premier temps, les résultats du processus préliminaire sont décrits puis viendront ceux du processus principal.

II.1. Processus préliminaire

Le processus préliminaire permet d'une part de définir la performance globale attendue pour un bâtiment dans le cas où la méthode présentée ici est mise en œuvre et d'autre part de déterminer le processus à suivre pour exécuter la méthode de manière optimale.

a. Etape A : Construire la famille d'indicateurs de performance

Afin d'expérimenter notre méthode, la première étape a été de poser le cadre quant aux objectifs de performance souhaités pour un bâtiment performant au regard des enjeux actuels de développement durable, autrement dit d'un point de vue énergétique et environnemental, économique et enfin sociétal.

Aussi le choix de la construction de cette famille est fait sur la base des projets Intégrabilité et Réhascope du CSTB, notamment à travers les travaux de Arantes (2013) et Thorel [Thorel, 2014]. Les travaux de Bazzana (2011) ont également contribué à la construction de cette famille, ainsi que le règlement (UE) n°305/2011 du parlement européen et du conseil du 9 mars 2011 [RPC, 2011], les normes NF EN 15217 [AFNOR, 2008] et NF P01-010 [AFNOR, 2004] et la certification HQE [HQE, s.d.]. Sur cette base, une réflexion a été menée afin de répondre au mieux aux problématiques actuelles de la construction, vie/exploitation et dépose d'un bâtiment.

La famille d'indicateurs de performance est décomposée en six cibles de performance. Ces six cibles de performance ont été choisies afin d'être représentatives d'un bâtiment qui serait efficient, performant de manière globale et non pas seulement d'un point de vue énergétique ou environnemental. En effet, afin d'adopter une approche systémique et de répondre aux défis sociétaux actuels tels que la santé, le changement climatique, la pénurie des ressources naturelles, l'énergie et la sécurité auxquels fait face le monde d'aujourd'hui, il est important de prendre en compte toutes les dimensions d'un bâtiment et les manières dont celui-ci impacte l'ensemble de ces priorités. En outre, la famille d'indicateurs de performance doit répondre aux questions liées à l'étape de construction. Bien qu'éphémère, cette étape, qui n'en est pas moins essentielle et inévitable peut avoir un impact sur la performance d'un ouvrage.

Les six cibles choisies sont les suivantes :

- **Qualité d'usage** (11 indicateurs) : cible regroupant l'ensemble des indicateurs inhérents aux critères 'social' de la performance globale, qui vise entre autres à satisfaire les besoins en santé, confort, utilisations/destinations et accessibilité ;

- **Robustesse à la Mise En Œuvre (MEO**) (4 indicateurs) : cible regroupant les indicateurs permettant de qualifier l'impact d'un composant lors de sa mise en œuvre, étape clef lors d'un projet de construction ;

- **Coût global** (5 indicateurs) : cible regroupant l'ensemble des indicateurs liés aux critères 'économique'

- **Energie & Environnement** (6 indicateurs) : cible regroupant l'ensemble des indicateurs permettant de qualifier l'impact énergétique et environnemental de l'ouvrage ;

- **Sûreté d'usage** (3 indicateurs) : cible regroupant les indicateurs consécutifs à la sécurité des biens et surtout des personnes ;

- **Sécurité opérateur** (1 indicateur) : cible-indicateur concernant la sécurité de l'opérateur lors de l'étape de mise en œuvre.

Lors de la construction de cette famille d'indicateurs de performance, 8 cibles ont été proposées pour ensuite être réduites aux 6 cibles proposées ici. Par exemple, au départ la cible 'Energie & Environnement' constituait deux cibles indépendantes. Cependant, au regard des problématiques actuelles de performance énergétique et environnementale dans le bâtiment, non pas seulement énergétique comme par le passé et à l'instar de la prochaine Réglementation Thermique qui se transforme en Réglementation Energétique et Environnementale, ces deux cibles ont été réunies dans une et même cible. Cette réglementation préconisera ainsi des bâtiments à énergie positive et à faible empreinte carbone [GOUV, 2016].

D'autres part le choix a été fait de distinguer la cible 'Sûreté d'usage' liée à l'exploitation de l'ouvrage de la 'Sécurité opérateur' liée à la construction de l'ouvrage.

Lorsque le choix s'est arrêté sur ces 6 cibles, environ 45 indicateurs étaient répartis entre celles-ci. Néanmoins, certains d'entre eux étaient liés créant un manque de clarté et d'exploitabilité. L'enjeu de cette famille d'indicateurs de performance est qu'elle soit la plus exploitable et représentative des enjeux et problématiques actuels liés à la construction, mais également que les indicateurs soient compris et dans l'idéal acceptés par l'ensemble des acteurs du domaine. Aussi, le choix a été fait de proposer des indicateurs les plus indépendants possible les uns des autres, ce qui n'est pas une tâche aisée. Il a également été choisi de ne pas inclure d'indicateur de durabilité, puisque celle-ci est déjà implicitement inclue dans plusieurs indicateurs et dans la problématique globale. En effet, si plusieurs indicateurs de performance se dégradent dans le temps, alors la performance globale se dégrade, ce qui impacte nécessairement la durabilité de l'ouvrage. En outre, la famille d'indicateurs de performance proposée ici n'est pas figée. Il s'agit bien là d'une proposition parmi tant d'autres, et libre à l'utilisateur de la méthode d'adopter sa famille d'indicateurs de performance propre, répondant à ses propres enjeux et problématiques.

Dans le Tableau 11, la famille d'indicateurs, proposée dans le cadre de ces travaux de recherche, est présentée, elle est constituée de 30 indicateurs de performance accompagnés de leur définition répartis en 6 cibles.

Tableau 11 : Famille d'indicateurs de performance

Qualité d'usage	Confort acoustique	I1	Confort de l'usager au regard des bruits générés par les autres occupants, des bruits provenant de l'extérieur et ceux générés par les équipements techniques du bâtiment.
	Confort hygrothermique	I2	Confort de l'usager dans un environnement donné au regard de son ressenti selon trois critères : la température, l'humidité et la vitesse de l'air.
	Confort visuel	I3	Confort de l'usager au regard de l'équilibre des luminances, des niveaux d'éclairement, de la gestion de l'éblouissement, du rendu des couleurs; de l'éclairage naturel et de la vue sur l'extérieur. Les ambiances intérieures doivent permettre à l'occupant d'exercer son activité sans occasionner de gêne ou de fatigue oculaire.
	Qualité de l'air intérieur - QAI	I4	Qualité de l'air intérieur pour le confort et la santé de l'usager au regard des polluants (de nature physique, chimique ou biologique) présents dans l'air intérieur et provenant de l'intérieur et de l'extérieur du bâtiment.
	Qualité de l'eau (sanitaire) - QES	I5	Qualité de l'eau sanitaire pour la santé de l'usager au regard des polluants (de nature physique, chimique ou biologique) présent dans l'eau sanitaire.
	Entretien et maintenance	I6	Simplicité de maintenance & entretien du bâtiment (produits/procédés et équipements).
	Adaptabilité au comportement des utilisateurs	I7	Prise en compte du comportement humain et des habitudes dans la conception et la réalisation du bâtiment. (indicateur transversal)
	Adéquation à l'usage du bâtiment	I8	Respect de l'usage et la fonction du bâtiment.
	Adéquation à un changement d'usage du bâtiment	I9	Possibilité du bâtiment à s'adapter et à évoluer vers un nouvel usage.
	Intégration urbaine	I10	Intégration urbaine du bâtiment au regard de son implantation, son intégration dans son environnement, sa cohésion par rapport aux équipements publics et aux autres bâtiments (logements, entreprises, …), sa contribution au regard des besoins locaux.
	Accessibilité	I11	Accessibilité du bâtiment en termes de desserte et d'accès à ce bâtiment en tenant compte des différents moyens de transports (piéton, cycliste et conducteur).
Robustesse (à la MEO)	Simplicité d'emploi (MEO)	I12	Simplicité de la mise en œuvre du produit/procédé considéré.
	Gêne engendrée par la MEO du procédé	I13	Nuisances produites lors de la mise en œuvre du produit/procédé pour les riverains et occupants (si en site occupé).
	Temps de MEO	I14	Durée de mise en œuvre du produit/procédé
	Nombre de corps d'état impliqués	I15	Nombre de corps d'état impliqués lors de la mise en œuvre du produit/procédé afin de rendre compte du nombre d'interfaces.
Coût global	Coût initial (à la livraison)	I16	Coûts d'investissements, de transports et de mises en œuvre.
	Coût à la livraison	I17	Coûts de procédures, de contrôles et de levée des réserves.
	Coût en exploitation	I18	Coûts d'exploitation et de maintenance.

	Coût de fin de vie	I19	Coûts de fin de vie et de recyclage.
	Coût d'externalité	I20	Coûts d'externalité (Pertes liées à l'exploitation).
Énergie & Environnement	Perméabilité à l'air	I21	Sensibilité du bâtiment vis-à-vis des infiltrations ou fuites d'air à travers l'enveloppe.
	Performance thermique de l'enveloppe	I22	Capacité de l'enveloppe à isoler thermiquement.
	Consommation d'énergie primaire totale	I23	Total des énergies puisées dans les ressources naturelles qui sont utilisées (énergies procédés) ou temporairement mobilisées (énergies matières).
	Changement climatique	I24	Impact des gaz émis contribuant à l'augmentation de l'effet de serre et de la température moyenne de la Terre, modifiant ainsi le climat.
	Gestion de l'eau	I25	Quantité d'eau prélevée pour les usages autres que le fonctionnement et l'exploitation du bâtiment. Prend également en compte la gestion des eaux usées.
	Gestion des déchets	I26	Quantité totale de tous les déchets produits (inertes, non dangereux, radioactifs) sur tout ou partie du cycle de vie du bâtiment.
Sûreté d'usage	Sécurité pour un risque assurable	I27	Situations concernant des risques, étant couverts par l'assurance, ayant un impact sur la sécurité de l'ouvrage.
	Sécurité pour un risque non assurable	I28	Situations concernant des risques, n'étant pas couverts par l'assurance, ayant un impact sur la sécurité de l'ouvrage.
	Sécurité utilisateur	I29	Situations comportant des risques ayant un impact sur la sécurité des usagers utilisant l'ouvrage.
Sécurité opérateur		I30	Situations comportant des risques ayant un impact sur la sécurité des opérateurs lors de phases de mise en œuvre.

A chacun de ces indicateurs de performance, le choix est fait de leur associer une échelle qualitative ordinale afin de permettre aux experts d'évaluer l'impact de chacun des couples 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance. La graduation est commune à l'ensemble des échelles :

- Graduation de 0 à 5 ;
- 0 signifie que le couple 'aléa/risque' n'a pas d'impact sur l'indicateur de performance ;
- 1 signifie que l'impact négatif du couple 'aléa/risque' est le moins préjudiciable pour l'indicateur de performance ;
- 5 signifie que l'impact négatif du couple 'aléa/risque' est le plus préjudiciable pour l'indicateur de performance ;
- 2, 3, 4 permettent de nuancer l'impact négatif du moins préjudiciable au plus préjudiciable.

Une même échelle pour l'ensemble des indicateurs de performance permet de pouvoir comparer les indicateurs de performance entre eux.

Une fois cette première étape primordiale pour le bon déroulement de la suite de la méthode, la deuxième étape préliminaire permettant de déterminer quel est le processus à suivre pour le composant de construction étudié a pu être exécutée.

b. Etape B : Choisir le processus à suivre

Cette étape a permis de définir quel processus est à suivre pour le procédé largement diffusé 'ETICS'.

i. Le composant étudié est-il largement diffusé ?

Le choix du procédé de construction 'ETICS' ayant été fait notamment parce que c'est un procédé largement diffusé (largement mis en œuvre et notamment depuis 2012, chaque année, environ 12 000 m², sont posés [TBC, 2016]) la réponse à la première question de cette étape est oui.

ii. Existe-t-il la possibilité de recueillir un retour d'expériences via des bases de données existantes ou des spécialistes du composant ?

A cette question, pour le procédé 'ETICS', la réponse est oui. En effet :

- un retour d'expériences assez conséquent a pu être accumulé via l'AQC dans le cadre de la base de données REX BP, avec notamment plusieurs aléas ayant un impact négatif sur un ou plusieurs indicateurs de performance ;
- 3 spécialistes de ce procédé ont été identifiés, notamment au regard de leurs expériences et connaissances précises de ce procédé :
    - Un ingénieur ayant contribué notamment à l'établissement des règles professionnelles pour l'entretien et la rénovation de systèmes d'isolation thermique extérieure « ETICS » [UPPF/SFJF, 2010] ;
    - Deux spécialistes chargés des ETICS au sein d'une fédération professionnelle.

Au regard des deux réponses positives aux deux questions de cette étape préliminaire, le processus à suivre est le processus principal.

II.2. Processus principal : Un procédé largement diffusé : ETICS

Cette partie expose le déroulement étape par étape du processus principal pour le composant ETICS, ainsi que les résultats associés.

a. Etape 1 : Identifier les aléas (ou les couples 'aléa/risque') associés au composant intégré

La première étape permet de rassembler l'ensemble des couples 'aléa/risque' associés au composant intégré dans le bâtiment. Dans le cas de l'ETICS, l'AQC s'est proposé de nous faire une extraction de sa base de données REX BP, nous permettant ainsi dans un premier temps d'identifier les couples 'aléa/risque' recensés via cette base de données.

A cette première source d'informations, les règles professionnelles [UPPF/SFJF, 2010] ont permis de compléter cette première identification.

Dans un deuxième temps, des échanges avec les trois spécialistes identifiés lors de l'étape préliminaire B (*cf.* PARTIE 3 : CHAPITRE 1 : II.1.b ci-dessus) ont permis d'affiner et de compléter la liste de couple 'aléa/risque'. Les informations ont été consignées sous forme de tableau (*cf.* Tableau 12

Tableau 12) en précisant la source de l'information afin de pouvoir à tout moment la retrouver et la revérifier si nécessaire. Les données consignées (*cf.* Tableau 12) à cette étape pour le procédé ETICS sont plus nombreuses que celles réellement demandées pour le bon déroulement de la méthode. En effet, en plus des informations de base récoltées pour chaque couple 'aléa/risque' de l'aléa et du risque associé (comme présenté PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1), les conséquences étaient parfois déjà disponibles et ont donc pu être consignées. Cela a permis d'accumuler ces données dès le départ, au lieu d'attendre le recueil de données des experts. Ce qui ne signifie pas que la suite de la méthode doit être modifiée. Au contraire, ces informations peuvent servir de point de comparaison et de complément au regard des données fournies ultérieurement par le panel d'experts.

Tableau 12 : Tableau consignant l'identification des couples aléa/risque issus des différentes sources d'informations potentielles (bases de données, littératures, spécialistes du composant étudié)

Sources de l'information	Aléa		Risque		Conséquences	
	Description	Cycle de vie	Description	Cycle de vie	Description	Cycle de vie

A l'issue de cette première étape du processus principal, le Tableau 13 regroupe l'ensemble des couples 'aléa/risque' identifiés lors de l'étape 1 du processus principal pour le procédé ETICS.

Aux 13 couples 'aléa/risque' identifiés via les différentes sources d'informations, s'ajoute le couple concernant la « prise en compte de l'incertain » explicité dans le paragraphe PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.1.

Une fois les principaux couples 'aléa/risque' identifiés, le choix du panel d'experts s'impose afin de pouvoir récolter les données qui nous intéressent.

Tableau 13 : Identification des couples ‘aléa/risque’ pour le procédé ETICS

	Aléa									Risque								
	Description N'hésitez pas à ajouter vos remarques concernant ces aléas.	**Cycle de vie** A quelle étape du cycle de vie du bâtiment l'aléa apparaît ? Plusieurs étapes peuvent être sélectionnées. N'hésitez pas à en proposer d'autres								**Description**	**Cycle de vie** A quelle étape du cycle de vie du bâtiment le risque apparaît ? Plusieurs étapes peuvent être sélectionnées et différentes de celles proposées pour l'aléa.							
		Conception	Fabrication ETICS	Transport ETICS	Stockage ETICS	Mise en œuvre	Mise en service	Exploitation	Dépose		Conception	Fabrication ETICS	Transport ETICS	Stockage ETICS	Mise en œuvre	Mise en service	Exploitation	Dépose
Aléa 1	Salissures atmosphériques - Dépôts de poussières atmosphériques sur la finition de l'enduit mince						x	x		Défaut d'aspect -> Salissures atmosphériques sur l'enduit mince						x	x	
Aléa 2	Éclaboussures dues à la pluie qui rebondit sur le sol ; si elles sont chargées de terre, elles maculent les soubassements - Rejaillissements d'eau sale ou boueuse sur la finition de l'enduit mince						x	x		Défaut d'aspect -> Rejaillissements sur l'enduit mince						x	x	
Aléa 3	Micro-organismes - Développement de micro-organismes sur la finition de l'enduit mince						x	x		Défaut d'aspect -> Fort encrassement dû au développement de micro-organismes et dont la présence reste marquée après lavage et décontamination (incrustation) de l'enduit mince						x	x	

	Aléa									Risque								
	Description N'hésitez pas à ajouter vos remarques concernant ces aléas.	**Cycle de vie** A quelle étape du cycle de vie du bâtiment l'aléa apparaît ? Plusieurs étapes peuvent être sélectionnées. N'hésitez pas à en proposer d'autres								**Description**	**Cycle de vie** A quelle étape du cycle de vie du bâtiment le risque apparaît ? Plusieurs étapes peuvent être sélectionnées et différentes de celles proposées pour l'aléa.							
		Conception	Fabrication ETICS	Transport ETICS	Stockage ETICS	Mise en œuvre	Mise en service	Exploitation	Dépose		Conception	Fabrication ETICS	Transport ETICS	Stockage ETICS	Mise en œuvre	Mise en service	Exploitation	Dépose
Aléa 4	Défaut de matériaux - Remontée de liant en surface					MEO + séchage				Retrait superficiel trop important ou trop rapide de la couche de finition de l'enduit mince						x	x	
Aléa 5	Défaut d'exécution - Couche trop épaisse d'enduit mince					x				Retrait superficiel trop important ou trop rapide de la couche de finition de l'enduit mince						x	x	
Aléa 6	Défaut d'exécution ponctuel - Points singuliers non faits					x				Diverses fissurations localisées, sous réserve qu'elles affectent moins de 1 % des surfaces considérées (sur la base de 1 m² affecté calculé de la façon suivante : 5 mètres de fissures sur 0,20 m de large)						x	x	
Aléa 7	Défaut d'exécution ponctuel - Joints trop ouverts rebouchés à l'enduit					x				Rebouché à l'enduit						x	x	

	Aléa								Risque							
	Description N'hésitez pas à ajouter vos remarques concernant ces aléas.	**Cycle de vie** A quelle étape du cycle de vie du bâtiment l'aléa apparaît ? Plusieurs étapes peuvent être sélectionnées. N'hésitez pas à en proposer d'autres								**Description**	**Cycle de vie** A quelle étape du cycle de vie du bâtiment le risque apparaît ? Plusieurs étapes peuvent être sélectionnées et différentes de celles proposées pour l'aléa.							
		Conception	Fabrication ETICS	Transport ETICS	Stockage ETICS	Mise en œuvre	Mise en service	Exploitation	Dépose		Conception	Fabrication ETICS	Transport ETICS	Stockage ETICS	Mise en œuvre	Mise en service	Exploitation	Dépose
Aléa 8	Défaut d'exécution - Liaison avec l'isolant au support assurée par adhérence ou fixations mécaniques non parfaitement assurée					x				ETICS menace de tomber ou tombe						x	x	
Aléa 9	Pas ou mauvaise préparation du support (non planéité, fissure, reste de colle ou de revêtement, …)					x				Mauvaise adhérence de l'isolant sur le support 'Dégradation de l'ETICS					x			
Aléa 10	Défaut de conception (mauvais calepinage, ...)	x								Ponts thermiques linéiques (liaisons Plancher bas/mur-refend, Plancher courant/mur, Toiture/mur-refend, Mur/mur-refend, Encadrement de baies/mur) Mauvaise résistance au vent, choc, incendie, eau, …						x	x	
Aléa 11	Opérateurs non formés / non sachant					Chantier + MEO				Pose de l'ETICS mal exécutée					x			

	Aléa									Risque								
	Description N'hésitez pas à ajouter vos remarques concernant ces aléas.	**Cycle de vie** A quelle étape du cycle de vie du bâtiment l'aléa apparaît ? Plusieurs étapes peuvent être sélectionnées. N'hésitez pas à en proposer d'autres								**Description**	**Cycle de vie** A quelle étape du cycle de vie du bâtiment le risque apparaît ? Plusieurs étapes peuvent être sélectionnées et différentes de celles proposées pour l'aléa.							
		Conception	Fabrication ETICS	Transport ETICS	Stockage ETICS	Mise en œuvre	Mise en service	Exploitation	Dépose		Conception	Fabrication ETICS	Transport ETICS	Stockage ETICS	Mise en œuvre	Mise en service	Exploitation	Dépose
Aléa 12	Travaux réalisés en site occupé					x				Gênes pour les occupants					x			
Aléa 13	Actions des habitants, riverains							x		Dégradation de l'ETICS par les habitants / riverains						x	x	
Aléa 14	Aléas non prévus -> Concerne la part d'incertitude sur les aléas	x	x	x	x	x	x	x	x	Risques non prévus découlant des aléas non prévus	x	x	x	x	x	x	x	x

b. Etape 2 : Sélectionner le panel d'experts

Pour sélectionner le panel d'experts, trois informations sont importantes :

- Le procédé ETICS est un composant largement diffusé : le panel doit donc être représentatif de l'ensemble des métiers du domaine du bâtiment et ceux sur tout le cycle de vie du bâtiment ;
- Les experts retenus sont soit :
    - Des spécialistes du composant étudié ;
    - Des professionnels ayant une vision globale et travaillant sur des projets de construction intégrant le composant étudié.

Dans le cadre de l'expérimentation et pour garantir un nombre d'experts suffisant pour pouvoir exploiter les retours d'expériences à minima, une campagne de « recrutement » d'experts a été faite et environ quatre-vingt personnes, correspondant à l'un des deux types d'experts, ont été contactées. La difficulté rencontrée a été que la méthode étant expérimentée pour la première fois, il n'y avait pas de cas d'étude « exemple » à proposer aux personnes contactées. En outre aucune rémunération n'était proposée, les convaincre de contribuer ne fût donc pas une tâche aisée, bien qu'en contrepartie de leur contribution, l'ensemble des résultats obtenus pour le composant étudié leur était restitué.

Cependant, dix personnes ont répondu positivement, 3 ont abandonné par la suite. Le panel d'experts final fut ainsi constitué de 7 personnes :

- 1 spécialiste ETICS d'une fédération professionnelle ;
- 1 contrôleur technique ;
- 1 directeur technique du service technique d'un industriel fabricant des ETICS ;
- 1 thermicien ;
- 1 conducteur de travaux ;
- 2 bailleurs sociaux.

Ce panel d'experts comprend ainsi des spécialistes du composant étudié (2), des professionnels ayant une vision globale (5) et est représentatif des différents métiers de la construction et ce sur tout le cycle de vie du bâtiment.

Afin de pouvoir exploiter à minima les retours d'expériences, nous nous étions fixé un panel d'experts représentant environ 10 % des personnes contactées. Grâce à ces sept experts, nous sommes à 9 %, nous avons jugé cela correct au regard des difficultés rencontrées et de la contrainte de temps pour mener à bien l'expérimentation. Avant de recueillir les données auprès du panel, la capacité de chacun des experts à restituer ses connaissances au regard de la réalité est estimée.

Les experts sont nommés E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7 indifféremment à la liste détaillant leur métier ci-dessus.

c. *Etape 3-1 : Pondérer le panel d'experts*

Cette étape incontournable de contrôle de la qualité de l'information restituée par chaque expert (cf. PARTIE 1 : CHAPITRE 3) permet de connaitre leur capacité à donner une information dite :

- Précise statistiquement : l'information provenant de l'expert et celle réelle sont les plus proches possible ;
- « Informative » : mesure comment l'information estimée par l'expert est concentrée.

Pour cette étape, un questionnaire de calibration a été créé, puis les experts l'ont complété, ce qui a permis de déterminer le poids de chaque expert afin de combiner les données.

i. *Préparer le questionnaire de calibration des experts*

Afin de calibrer les experts, il est nécessaire de créer un questionnaire permettant de comparer les réponses des experts à des données de référence. Aussi, la difficulté réside dans le choix de questions pertinentes au regard des valeurs d'intérêts que sont les données attendues pour la suite du processus principal, en outre pour ces questions il est nécessaire de disposer des réponses réelles, vraies valeurs ou valeurs « correctes ». Les réponses réelles (disponibles dans la littérature ou par l'expérience notamment) à ces questions constituent les références permettant la comparaison avec les réponses estimées par les experts.

Dans notre cas, les questions ont été difficiles à choisir, puisque peu d'informations sur les données à récolter sont disponibles, cependant un questionnaire de 10 questions (*cf.*Annexe D) a été créé afin d'expérimenter la calibration des experts. Ces questions ont été créées grâce aux données issues de l'Etude de marché : L'isolation thermique des murs par l'extérieur en France [TBC, 2016] et aux données extraites par l'AQC de sa base Sycodés [AQC, 2017c] (base de données de l'AQC exploitant un échantillon de désordres que les experts construction signalent, ce sont à 80 % des Dommages-Ouvrage, DO).

Cette étape de pondération des experts au regard de leur performance à exprimer leurs opinions a été ajoutée à la méthode après avoir ressenti le besoin de fiabiliser au mieux les données fournies par les experts et alors que l'expérimentation de la méthode avait déjà commencé. En effet, l'étape de contribution des experts à la matrice d'aléas avait déjà commencé. Les données concernant l'impact des aléas sur le composant était demandées pour les quantiles 25, 50 et 75. Cependant la méthode classique de Cooke (1991) (permettant de fiabiliser les données fournies par les experts en pondérant leurs données au regard de leur capacité à exprimer des estimations de valeurs incertaines) préconise de récolter les données pour les quantiles 5, 50 et 95. Aussi lors de l'expérimentation de la méthode classique de Cooke pour le procédé ETICS, il a été choisi dans un premier temps de récolter les données pour les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 d'une part par précaution et d'autre part pour ne pas à avoir à solliciter de nouveau les experts qui ont été très compréhensifs et ont accepté à

plusieurs reprises de contribuer à la méthode, notamment les premiers experts recrutés. Cependant, n'ayant pas les données pour les quantiles 5 et 95 pour les variables d'intérêt, autrement dit pour les données concernant l'impact des aléas sur le composant, ces données n'ont pas servi dans cette expérimentation. Néanmoins, il est préconisé de récolter auprès des experts l'ensemble des données pour les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95 ou seulement 5, 50 et 95.

ii. Contribution des experts au questionnaire de calibration

Afin de pouvoir calibrer les experts, ils ont par conséquent répondu au questionnaire. Les réponses du panel d'experts au questionnaire de calibration sont recensées dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Réponses des experts (E1 à E7) au questionnaire de calibration (cf Annexe D) – en gras les valeurs estimées par l'expert encadrant la valeur réelle, la ligne de la question de calibration 8 est grisonnée car non prise en compte puisque l'expert E7 n'a pas su répondre

Experts	Valeurs réelles	E1					E2					E3					E4				
Quantiles		5	25	50	75	95	5	25	50	75	95	5	25	50	75	95	5	25	50	75	95
1	25,2%	7	13	20	**22**	**35**	15	17	20	**21**	**30**	0	1	2	5	15	50	55	60	68	75
2	9,1%	0	1	5	6	8	15	17	20	21	25	0	0	1	2,5	5	**0**	**12**	20	25	40
3	23,2%	5	6	15	16	23	6	8	10	12	15	2	3	5	**15**	**25**	0	5	10	12	15
4	33,1%	8	14	21	**23**	**36**	8	9	10	12	15	2	3	5	10	15	0	10	15	18	20
5	8,0%	0	0	2	2,5	4	3	4	5	6	7	5	**7**	**10**	17	20	0	1	2	3	5
6	22,6%	5	6	15	**16**	**23**	6	8	10	12	15	5	7	12	18	20	0	3	5	7	10
7	55,6%	**50**	**70**	80	82	90	30	38	40	**55**	**60**	**55**	**60**	70	72	75	20	28	30	42	50
8	32,0%	10	12	25	27	**32**	65	67	70	72	75	60	65	70	75	80	5	12	15	20	30
9	91,0%	85	89	**90**	**95**	98	70	78	80	82	85	82	84	85	87	88	70	77	80	83	90
10	80,0%	33	40	50	60	62	50	55	60	68	70	70	74	75	77	**80**	30	45	50	60	70

Experts	Valeurs réelles	E5					E6					E7				
Quantiles		5	25	50	75	95	5	25	50	75	95	5	25	50	75	95
1	25,2%	5	8	15	16	20	10	13,5	15	**22**	**30**	5	15	**20**	**30**	40
2	9,1%	1	3	5	**7**	**10**	2	3	5	6	8	5	**7**	**15**	20	25
3	23,2%	1	2	3	4	5	4	5	8	9	10	5	6	**20**	**35**	40
4	33,1%	5	8	15	16	20	7	8	10	15	20	15	16	17	**35**	**40**
5	8,0%	1	2	3	4	5	2	3	5	6	7	5	**7**	**15**	20,0	25
6	22,6%	1	2	3	4	5	2	2,5	4	4,5	6	5	6	**20**	**35**	40
7	55,6%	40	44	45	50	55	40	45	50	**55**	**60**	75	79	80	94	95
8	32,0%	50	65	70	75	80	20	27	**30**	**48**	50					
9	91,0%	85	87	**90**	**92**	95	60	68	70	78	80	85	86	**90**	**94**	85
10	80,0%	**80**	82	85	87	90	40	48	50	63	65	40	45	60	64	65

L'expert E7 n'a pas répondu à la question de calibration n°8. En effet, il est possible qu'un expert ne soit pas en mesure de répondre à une question de calibration. Aussi cette question sera écartée lors de l'étape suivante consistant à déterminer le poids de chaque expert. D'où la nécessité, d'une part de bien sélectionner les experts, et d'autre part d'avoir le plus de question de calibration possible pour ne pas se retrouver avec un questionnaire avec trop peu de questions ayant une réponse de l'ensemble des experts. En effet, un nombre de questions de calibration adéquate permettra une pondération des experts fine, à condition que les questions soient appropriées.

iii. Déterminer le poids de chaque expert

Une fois l'ensemble des probabilités subjectives estimées par les experts, les données sont rentrées dans le logiciel EXCALIBUR.

Et le poids de chaque expert peut être déterminé, ils sont présentés dans le Tableau 15

Tableau 15 : Poids des experts au regard de leur performance à exprimer un jugement

Experts	Pondération
E1	0,01711
E2	0
E3	0,019
E4	0
E5	0,02493
E6	0
E7	0,4259
Somme	0,48694
Pondération de l'expert fictif issu de la combinaison des 7 experts	0,5131

Il peut être remarqué que sur les sept experts, trois experts ont un poids nul, trois ont un poids inférieur à 1 % et seulement un expert à un poids significatif, l'expert E7. En effet, sur le Tableau 7, lorsque les estimations élicitées par les experts encadrent la valeur réelle alors elles sont en gras et il peut être constaté que pour les experts E2, E4 et E6 ayant obtenu un poids nul, seulement 1 ou 2 valeurs réelles tombent dans leurs estimations ; pour les experts E1, E3 et E5 ayant obtenu un poids inférieur à 1 %, entre 3 et 5 valeurs réelles tombent dans leurs estimations et enfin pour l'expert E7, ayant obtenu un poids significatifs, 7 valeurs réelles sur les 9 tombent dans ses estimations.

Ainsi parfois, il arrive que seulement un expert soit précis statistiquement et « obtienne » tous le poids par rapport aux autres experts comme dans notre cas. Cela signifie que cet expert est celui sur lequel s'appuyer et a contrario les autres experts ne sont pas performants pour estimer des jugements pour des valeurs incertaines. Lors d'un échange avec Aspinall (qui travaille avec Cooke et a effectué un certain nombre d'études utilisant la méthode classique),

il m'a rapporté qu'il a souvent constaté que les personnes, et même si elles sont des experts reconnus, ne sont pas bonnes à émettre des jugements pour des valeurs incertaines, ce qui est d'ailleurs confirmé par Burgman (2016).

Par ailleurs, plusieurs remarques sont importantes à préciser et concerne aussi bien le questionnaire de calibration présentés dans ce paragraphe, ainsi que la matrice d'aléa présentées dans le paragraphe suivant :

- Lorsque les experts élicitent les probabilités, les valeurs élicitées pour chaque quantile d'une même question sont :
    - distinctes entre elles : en effet, un expert ne peut pas donner la même valeur pour le quantile 50 et le quantile 75. Par exemple, si un expert donne la distribution suivante : quantile 25 : 30, quantile 50 : 80 et quantile 75 : 80, cela reviendrait à dire qu'il est en même temps à 50 % et à 75 % sûr que l'aléa arrive dans 80 % des cas. Ce qui n'est pas logique ;
    - cohérentes comme estimations de l'incertain.
- Si un expert n'a jamais rencontré l'aléa et alloue 0 à chaque quantile de la distribution de probabilités alors EXCALIBUR n'est pas capable de traiter cette information, les cases restent vide et EXCALIBUR ne prendra donc pas l'avis de ces experts pour combiner les données des experts entre elles. Cependant il est important de noter dans le compte rendu qu'un ou plusieurs experts n'ont jamais rencontré cet aléa et que c'est une information à prendre en compte :
    - Soit en trouvant un moyen de prendre en compte cette information lors de la combinaison des données ;
    - Soit si un nombre majoritaire d'experts indique ne jamais avoir rencontré l'aléa, il faut alors se poser la question si c'est dû au fait que cet aléa est en fait peu problématique ou parce qu'il est émergeant et est donc à considérer avec attention afin d'anticiper des impacts préjudiciables pour la performance globale.
- Si un expert ne peut répondre à une question de calibration ou à une question cible, alors les cases sont laissées vides dans EXCALIBUR. En revanche :
    - Dans le cas d'une question de calibration : EXCALIBUR écartera cette question pour déterminer le poids des experts ;
    - Dans le cas d'une question cible : EXCALIBUR écartera l'expert pour la question concernée lorsqu'il élicitera la distribution de probabilités issue de la combinaison des réponses fournies par les experts au regard de leur pondération respective.

L'enseignement de ces étapes de contribution des experts, aussi bien pour le questionnaire de calibration, que pour la matrice d'aléas est qu'il est essentiel de bien préparer à l'avance

les divers questionnements, surtout dans la phase d'expérimentation. Ainsi même si cela peut paraître évident, il est important de rappeler que d'une part il faut préciser au maximum chaque question, lever les ambiguïtés et d'autre part les tester au préalable auprès de personnes compétentes dans le domaine mais non recrutées pour le panel d'experts. Effectivement il est primordial de ne pas « fatiguer » les experts en les sollicitant à multiple reprises, surtout lors de la phase d'expérimentation, car ils sont une des clefs de la réussite de ce genre d'étude et bien qu'ils soient patients, un expert peut abandonner[20] au cours de l'étude, ce qui est préjudiciable quand le panel d'experts est restreint.

Au regard du nombre de questions de calibration (10 dans notre cas) et du nombre de quantiles demandés par distribution (5 dans notre cas), cette étape dure entre 10 à 20 min selon l'expert. Le temps utilisé par l'expert pour répondre à ce questionnaire n'apporte aucune information sur sa capacité à éliciter l'incertain.

d. Etape 3-2 : Construire la base de données 'aléa/impact' du composant

En parallèle de l'étape de pondération des experts, l'étape de construction de la base de données 'aléa/impact' est également exécutée. Ces deux étapes sont préconisées en parallèle pour solliciter les experts une unique fois (dans l'idéal) pour l'ensemble des contributions des experts (questionnaire de calibration et matrice d'aléas). Dans un premier temps, une matrice d'aléas a été créée puis les experts y ont contribué.

i. Création de la matrice d'aléas

Le défi de cette étape est de créer une matrice d'aléas la plus ergonomique et intelligible pour les experts (chacun avec sa vision propre) et facilement exploitable par la suite.

Dans le cadre de l'expérimentation, la matrice d'aléas a été créée sur un fichier Excel. Ce fichier comporte trois onglets :

- Présentation : cet onglet permet de présenter à la fois, les instructions pour le remplissage de la matrice d'aléas et le projet dans lequel elle s'intègre, ainsi que de renseigner les informations sur l'expert (ville, profession, civilité, prénom, nom, e-mail, téléphone, lieu de travail, temps de réponse à la matrice d'aléa : afin d'estimer une moyenne par la suite) ;

- Matrice : cet onglet contient la matrice à compléter avec les estimations des experts. Ce que contient cette matrice a été entièrement détaillé dans la partie précédente (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.4.a) ;

[20] Au cours de l'expérimentation 3 experts ont abandonnés sans mentionner de raisons précises : un expert a simplement cessé de répondre à un moment donné, un autre après avoir commencé à répondre à finalement estimer ne pas avoir assez de recul et d'expériences sur les ETICS, enfin le troisième s'était porté volontaire avec un fort intérêt pour la méthode mais n'a finalement jamais contribué.

- Echelle : cet onglet détaille l'ensemble des indicateurs de performance, ainsi que l'échelle utilisée pour chacun d'eux, les échelles étant basées sur le même principe (*cf.* PARTIE 3 : CHAPITRE 1 : II.1.a).

ii. Contribution des experts à la matrice d'aléas

Une fois que le fichier Excel contenant la matrice d'aléas à remplir par les experts est prêt, il leur a été proposé soit d'y contribuer :

- Avec mon aide sous forme d'entretien en personne ou par téléphone ;
- Par eux même, avec une assistance téléphonique de ma part.

En moyenne, les experts ont eu besoin de 1h30 à 2h00 pour contribuer à l'ensemble de la matrice. Encore une fois, le temps de contribution n'est pas représentatif de la qualité de leurs réponses.

Les experts n'étant pas toujours disponibles rapidement, il est essentiel de prévoir dès le départ un créneau dédié pour leur contribution à la fois pour la matrice et pour le questionnaire de calibration et le cas échéant de prévoir un plan de relance. Ce n'est pas aux experts de se rappeler de contribuer à la matrice mais à la personne en charge du recueil des données de trouver le bon équilibre pour les relancer afin d'obtenir leur contribution. Il existe de nos jours des logiciels de suivi de clients et relance qui peuvent faciliter cette tâche.

e. Etape 4 : Evaluer l'influence du composant intégré sur la performance globale du bâtiment

Une fois les contributions des experts recueillies, la question à se poser est de savoir si oui ou non le recueil de données est suffisant. Ensuite, les données récoltées peuvent être analysées afin d'évaluer l'influence du composant intégré sur la performance globale du bâtiment.

i. Le recueil de données est-il suffisant ?

Dans notre cas, nous nous étions fixés un pourcentage de 10 % d'experts participant à l'expérimentation au regard du nombre d'experts contactés au préalable lors de la constitution du panel. Comme expliqué précédemment (*cf.* PARTIE 3 : CHAPITRE 1 : II.2.b), avec 7 experts, le panel représente 9 % des personnes identifiées pour expérimenter la méthode.

Bien qu'un panel de 7 experts soit un peu faible pour obtenir des informations fines, nous avons jugé que cela était suffisant pour mener à bien l'expérimentation de la méthode. Cependant, les résultats issus des analyses sont à prendre avec précaution.

ii. Analyse des données

L'étape d'analyse des données a été une étape assez longue, puisque cela a nécessité d'appréhender les données et d'identifier les méthodes les plus adéquates au regard de l'information souhaitée.

Trois types d'information sont souhaités dans notre cas :

- Quels sont les indicateurs les plus sensibles aux couples 'aléa/Risque' ? Ceux qui seront les plus impactés par le composant de construction. Ainsi, au regard des performances souhaitées pour un bâtiment, cette information aide à choisir tel ou tel composant de construction plutôt qu'un autre puisque l'un dégradera moins les indicateurs de performances jugés importants pour un projet de construction donné ;

- Quels sont les couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables pour la performance globale à l'échelle du bâtiment ? Ce sont les couples qui dégradent la performance du bâtiment et sont par conséquent à surveiller, voire à anticiper dans le cas où ce composant de construction est choisi ;

- Quels sont les couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables pour le composant en lui-même ? Ce sont les couples qui dégradent le composant et donc ont un impact sur la durabilité du composant et par conséquent sur la performance globale. Ils sont par conséquent à surveiller également et voire à anticiper.

Comme précisé dans la partie précédente (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.b), les données ont été pondérées de trois manières différentes :

- Équiprobable ;

- Pondérées en fonction de chaque expert au regard de leur performance à exprimer un jugement (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.3) ;

- Pondérées au regard de l'expérience de chaque expert.

Le Tableau 16 regroupe l'ensemble des poids associés aux experts en fonction du type de pondération utilisé.

Tableau 16 : Poids des experts au regard des trois types de pondérations (équiprobable, au regard de leur performance à exprimer un jugement, au regard de leur expérience) pour combiner les données

Experts	Pondération		
	Equiprobable	Performance	Expériences
E1	0,14286	0,01711	0,0219
E2	0,14286	0	0,0073
E3	0,14286	0,019	0,3647
E4	0,14286	0	0,008
E5	0,14286	0,02493	0,3647
E6	0,14286	0	0,2261
E7	0,14286	0,4259	0,0073
Somme	1	0,48694	1
Pondération de l'expert fictif issu de la combinaison des 7 experts	0,006555	0,5131	0,01108

Alors que pour les pondérations 'équiprobable' et 'au regard de l'expérience', la somme des poids des 7 experts est égale à 1, pour la pondération 'au regard de leur performance à exprimer un jugement' la somme des poids n'est pas nécessairement égale à 1. En outre, certains experts ont un poids nul, tandis que l'expert E7 a un poids assez élevé (cf. remarque de Aspinall plus haut). En effet, sachant que le poids est calculé grâce à deux indicateurs qui sont la précision statistique (capacité de l'expert à donner une estimation proche de la valeur réelle) et le degré d'informativité (degré de concentration de la distribution) de chaque expert, plus un expert aura une précision statistique élevée, notamment au regard des autres experts, plus le poids qui lui sera associé sera élevé. Ce qui est le cas ici (*cf.* Tableau 17).

Tableau 17 : Précision statistique des experts issue de la méthode classique de Cooke (1991)

Experts	Précision statistique
E1	0,005466
E2	0,0003191
E3	0,005466
E4	0,001492
E5	0,005466
E6	1,58E-05
E7	0,2338

Ainsi, l'expert 7 est l'expert le plus « capable » d'estimer des valeurs en situation incertaine. Ceci ne remet pas en cause les connaissances de ces experts. Effectivement, il est courant que la plupart des gens, y compris des experts reconnus, ne soient pas très performants lorsqu'il s'agit d'estimer des valeurs en situation incertaine (Burgman, 2016).

iii. Identification des indicateurs les plus sensibles aux couples 'aléa/risque'

Pour identifier les indicateurs les plus sensibles aux impacts des couples 'aléa/risque', la médiane des 7 experts a été calculée pour chaque indicateur de performance sur la somme des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.c ci-dessus).

En Annexe E se trouve un tableau résumant les médianes obtenues pour chaque indicateur pour les trois types de pondérations retenues (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) pour combiner les données des experts. Pour chaque pondération le score Min et le score Max sont donnés. Ils correspondent à l'impact minimum des couples 'aléa/risque' rencontrés par les experts sur les indicateurs de performances, donc celui le moins préjudiciable pour les indicateurs de performances et de même l'impact maximum, le plus préjudiciable pour les indicateurs de performance. Le Tableau 18 est un extrait du tableau en Annexe F donnant le classement de la sensibilité des indicateurs pour les trois types de pondérations utilisées.

Tableau 18 : Classement de la sensibilité des indicateurs au regard du type de pondération choisi pour combiner les données des experts (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) - ETICS

Equiprobable		Performance		Expériences	
I6	5,429	I18	0,722	I18	0,964
I18	4,857	I6	0,719	I6	0,920
I10	3,857	I10	0,449	I27	0,810
I14	2,429	I27	0,380	I29	0,810
I8	2,286	I8	0,342	I10	0,635
I12	2,286	I28	0,285	I16	0,591
I26	2,286	I29	0,285	I12	0,460
I17	2	I16	0,274	I14	0,372
I22	1,857	I17	0,222	I22	0,329
I27	1,857	I13	0,150	I23	0,329
I29	1,857	I22	0,150	I13	0,299
I3	1,714	I23	0,150	I17	0,285
I13	1,714	I12	0,125	I26	0,204
I28	1,714	I30	0,11977	I30	0,153
I16	1,571	I14	0,075	I8	0,128

Le classement présenté dans le Tableau 18 permet de faire plusieurs constats :

1. Une certaine cohérence entre les indicateurs de performance les plus sensibles (I6, I10, I18) existe entre les trois types de combinaison des données ;

2. Cependant certains indicateurs de performance (I8, I14, I15, I26) sont sensibles, voire très sensibles pour deux types de combinaison des données et pas pour le troisième type ;

3. Enfin, la plupart des indicateurs (à l'exception de certains cas mentionnés en 2) n'étant pas ou peu impactés par les aléas sont les mêmes pour les trois types de combinaison de données.

Le constat 2 montre le fait que la pondération utilisée pour combiner les données des experts a un impact sur les résultats et donc qu'il est nécessaire de choisir la pondération permettant d'obtenir les résultats les plus proches possible de la réalité. A priori, le choix se porte sur la pondération au regard de la performance des experts à exprimer un jugement. En effet, la méthode classique de Cooke (1991) permettant cette pondération a été proposée pour utiliser les données issues d'experts avec autant de précaution que des données dites scientifiques et permettre d'avoir des données les plus proches de la réalité. En outre, la méthode classique a été utilisée dans plus de 30 études réelles où dans la plupart des cas les résultats obtenus avec une pondération au regard de la performance des experts à exprimer des jugements étaient plus proche de la réalité que ceux obtenus avec une pondération équiprobable [Colson,

2017]. Enfin, concernant la pondération au regard de l'expérience, elle peut s'avérer dangereuse, puisque l'expérience d'un expert ne garantit pas sa capacité à exprimer le mieux possible des jugements.

iv. Identification des couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables pour la performance globale – échelle du bâtiment

Pour identifier les couples 'aléa/risque' (par raccourci les aléas) étant les plus préjudiciables pour les indicateurs de performance et par conséquent pour la performance globale du bâtiment, la médiane des 7 experts a été calculée pour chaque aléa en prenant la somme pour chaque expert et pour chaque aléa des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance (*cf.* Tableau 8 – PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.5.d).

En Annexe G se trouve le tableau résumant les médianes obtenues pour chaque aléa pour les trois types de pondérations retenues (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) pour combiner les données des experts. Le Tableau 19 donne le classement des aléas les plus préjudiciables pour les trois types de pondération utilisés.

Tableau 19 : Classement des aléas en fonction de leur impact sur la performance globale au regard du type de pondération choisi pour combiner les données des experts (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) - ETICS

Equiprobable		Performance		Expériences	
A10	6,857	A10	0,821	A8	1,664
A14	6,857	A14	0,821	A13	1,161
A8	4,286	A9	0,475	A10	1,051
A9	4	A8	0,474	A14	1,051
A12	3,429	A12	0,342	A12	0,767
A3	3,286	A13	0,285	A3	0,729
A4	3	A7	0,222	A11	0,729
A13	2,714	A4	0,199	A2	0,723
A7	2,571	A5	0,125	A9	0,635
A11	2,571	A6	0,095	A1	0,548
A5	2,429	A11	0,050	A5	0,504
A1	2,286	A1	0,038	A4	0,460
A2	2,143	A2	0,038	A7	0,285
A6	2,143	A3	0,038	A6	0,197

Là encore, certains constats peuvent être faits, notamment :

1. Les aléas les plus préjudiciables le sont pour la plupart pour les trois types de combinaison de données utilisées ;

2. En revanche, l'aléa A3 (Micro-organismes - Développement de micro-organismes sur la finition de l'enduit mince) échappe complétement à ce constat puisqu'il ressort comme ayant un impact assez préjudiciable lorsque la pondération est équiprobable et au regard de l'expérience des experts a contrario de la pondération au regard de la performance à exprimer un jugement des experts pour lequel il ressort comme très peu impactant pour la performance globale. En regardant de plus près les données, il peut être remarqué que deux des trois experts sur les sept ayant donné à A3 un fort impact pour la performance globale ont pour l'un un poids issu de la pondération proche de 0,02 et pour l'autre nul. Donc au regard de la performance des experts à exprimer un jugement, leur avis a peu de poids par rapport à l'estimation de l'incertitude qui nous intéresse. Ce qui n'est pas autant le cas lors de la pondération au regard de leur expérience.

v. *Identification des couples 'aléa/risque' les plus préjudiciables pour la performance globale – échelle du composant*

Pour identifier les couples 'aléa/risque' (par raccourci les aléas) étant les plus préjudiciables pour le composant lui-même, les distributions de l'impact des couples 'aléa/risque' sur le composant issues des 7 experts ont été combinées pour chaque aléa au regard des trois pondérations utilisées (équiprobable, au regard de leur performance à exprimer un jugement, au regard de l'expérience).

Le tableau en Annexe H résume les médianes obtenues pour chaque aléa pour les trois types de pondération retenus pour combiner les données des experts. Le Tableau 20 donne le classement des aléas les plus préjudiciables pour les trois types de pondération utilisés.

Tableau 20 : Classement des aléas (pour le quantile 75%) en fonction de leur impact sur le composant au regard du type de pondération choisies pour combiner les données des experts (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) - ETICS

Equiprobable		Performance		Expériences	
A2	89%	**A2**	94%	**A12**	82%
A1	79%	**A3**	79%	**A10**	79%
A3	73%	**A11**	65%	**A1**	78%
A6	72%	**A6**	59%	**A6**	77%
A9	68%	**A7**	43%	**A2**	71%
A12	63%	**A1**	35%	**A9**	70%
A10	60%	**A12**	32%	**A7**	60%
A7	57%	**A14**	30%	**A5**	58%
A11	55%	**A10**	28%	**A3**	56%
A5	48%	**A9**	25%	**A11**	54%
A14	48%	**A13**	22%	**A8**	50%
A8	47%	**A8**	19%	**A13**	42%
A13	43%	**A5**	10%	**A14**	40%
A4	27%	**A4**	8%	**A4**	25%

Pour le quantile 75 %, qui représente un cas assez défavorable mais pas le plus défavorable, plusieurs constats peuvent être faits à la lecture de ce tableau :

1. Les aléas impactent fortement le composant de construction pouvant aller jusqu'à plus de 90 % de dégradation de l'ETICS pour les plus préjudiciables ;

2. Il apparait difficile de savoir où mettre une séparation entre les aléas qui seraient considérés comme acceptables et ceux comme non acceptables. On peut imaginer que chaque acteur de la construction a sa propre opinion sur le sujet et il est difficile de trancher a priori et de répondre à la question suivante : Quel(s) acteur(s) de la construction peu(ven)t prendre cette responsabilité ?

3. Il y a une certaine cohérence entre les différentes pondérations et également des différences en terme de pourcentage de dégradation de l'aléa sur le composant. Par exemple A2 (Eclaboussures dues à la pluie qui rebondit sur le sol) est le plus préjudiciables pour les pondérations équiprobable et au regard des performances des experts à émettre un jugement contrairement à la pondération au regard de l'expérience qui place l'aléa A12 (Aléas non prévus) et A10 (Opérateur non formés) comme les plus préjudiciables alors qu'ils le sont moins pour les deux autres types de pondérations.

III. Conclusion sur les résultats

En premier lieu, l'expérimentation de la méthode sur le composant largement diffusé ETICS soulève des interrogations quant à la pertinence des conclusions qui sont tirées ici puisque :

- D'une part le panel d'experts est petit et un peu plus de la moitié des experts ont obtenu des poids non nuls (4 sur 7), voire non négligeables (1 sur 7) (*cf.* explication PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : II.3), aussi il apparaît évident qu'il faut rechercher un plus grand nombre d'expert contributeur afin de s'assurer que plus d'un expert est performant à estimer des jugements pour des valeurs incertaines ;

- D'autre part, il n'existe pas de seuil permettant de conclure si un aléa est jugé inacceptable ou non ou a minima un seuil permettant de conclure si un aléa est jugé préjudiciable pour le composant, ainsi que pour le bâtiment. Aussi, la question à se poser ici est qui est en mesure de choisir ce seuil ? Les assurances, l'Agence Qualité Construction, les Groupes Spécialisés en charge de l'évaluation des composants de construction ?

Cependant, puisque le choix a été fait d'utiliser une procédure permettant de pondérer les experts au regard de leur performance à exprimer un jugement[21] et afin d'être en cohérence avec ce choix, une conclusion, à prendre avec précaution pour les raisons ci-dessus, est faite au regard de cette pondération.

Les indicateurs les plus sensibles (*cf.* Tableau 18 ci-dessus pour le détail et Figure 10 ci-dessous donnant l'information sous forme de diagramme radar) aux couples 'aléa/risque' recensés pour les ETICS pour l'impact maximum (le plus préjudiciable) que les experts ont rencontré sont :

- I18 (0,722) : Coût en exploitation (Coût global) ;
- I6 (0,719) : Entretien et maintenance (Qualité d'usage) ;
- I10 (0,449) : Intégration urbaine (Qualité d'usage) ;
- I27 (0,380) : Sécurité pour un risque assurable (Sécurité d'usage) ;
- I8 (0,342) : Adéquation à l'usage du bâtiment (Qualité d'usage) ;
- I28 (0,285) : Sécurité pour un risque non assurable (Sécurité d'usage) ;
- I29 (0,285) : Sécurité utilisateur (Sécurité d'usage) ;
- I16 (0,222) : Coût initial à la livraison (Coût global).

[21] Permet de fiabiliser les dires d'experts et de les rendre les plus exploitables possible

Ensuite les autres indicateurs ont obtenu des scores inférieurs à 0,200

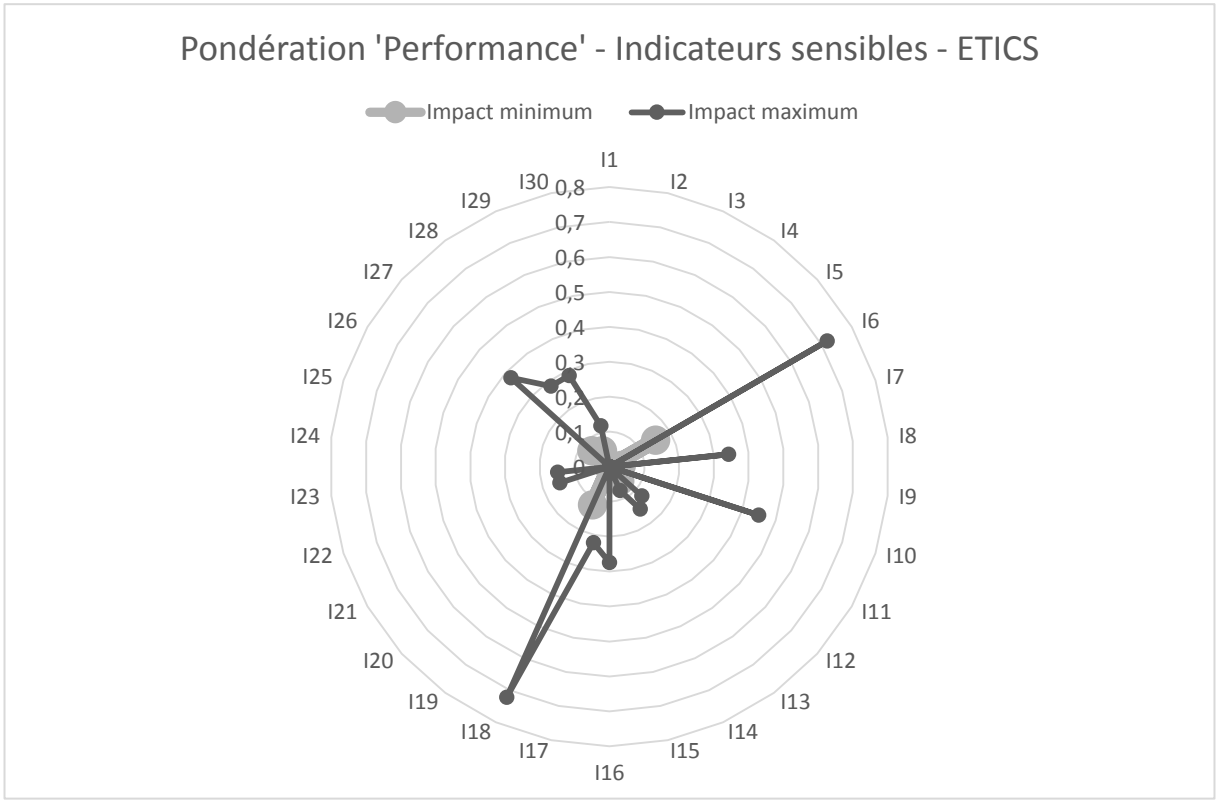


Figure 10 : Diagramme radar présentant la sensibilité des indicateurs de performance au regard de l'impact minimum et maximum des couples 'aléa/risque' pour la pondération des experts au regard de leur performance à exprimer un jugement

Il apparait ici que deux indicateurs concernant les performances économique et sociale se démarquent vraiment des autres avec des scores proches et assez élevés. De plus, il est intéressant de remarquer que ces deux indicateurs sont liés puisque qu'ils concernent tous les deux l'entretien et la maintenance, en effet dans le coût en exploitation inclut le coût lié à l'entretien et la maintenance. Ainsi, cela donne une indication sur le fait qu'il est probablement important de prévoir un budget dédié à l'entretien et à la maintenance, ainsi que d'optimiser ces derniers. Il est également intéressant de creuser un peu plus afin de déterminer à quel aléa cela est dû.

En outre, aucun indicateur de la cible énergie et environnement n'apparait dans les indicateurs ayant obtenus des scores assez élevés, ce qui est rassurant du fait qu'un isolant est censé améliorer ces performances et non les dégrader.

En revanche, les trois indicateurs de la cible sécurité d'usage sont impactés par les couples 'aléa/risque', ce qui donne une information sur le fait que ce procédé d'isolation nécessite peut-être d'être surveillé quant à la sécurité. Cependant, cela peut être tempéré par le fait que les scores sont en dessous de 0,400 pour l'un des trois indicateurs de la cible et 0,300 pour les deux autres et qu'il est important de définir un seuil pour savoir si l'indicateur est trop

sensible à l'intégration du composant dans le bâtiment ou non et donc s'il doit être surveillé ou non.

Enfin, ces résultats mettent en exergue le fait que bien que l'isolant ne dégrade que peu les performances énergétique et environnementale, les deux autres performances économique et sociale se trouvent dégradées. Ce qui valide ici l'intérêt d'une telle méthode dans un souci d'avoir non plus une approche centrée sur les performances énergétique et environnementale mais plutôt d'avoir une approche systémique.

Concernant l'impact des couples 'aléa/risque' sur le composant (*cf.* Tableau 20 ci-dessus et la Figure 11 ci-dessous), les résultats seront regardés pour le 75^{e} quantile. C'est-à-dire que dans 75 % des cas, le composant est dégradé au maximum du pourcentage de dégradation obtenu après combinaison des données issues des experts. Cela n'inclut donc pas les dégradations les plus préjudiciables rencontrées par les experts.

Les couples 'aléa/risque' dégradant le plus le composant sont :

- A2 (94 %) : Eclaboussures dues à la pluie qui rebondit sur le sol ;
- A3 (79 %) : Développement de micro-organismes sur la finition de l'enduit mince ;
- A11 (65 %) : Travaux en site occupé ;
- A6 (59 %) : Défaut d'exécution ponctuel – Points singuliers non faits ;
- A7 (43 %) : Défaut d'exécution ponctuel – Joints trop ouverts rebouchés à l'enduit.

Les autres couples ont des pourcentages inférieurs à 40 %[22].

Pour le composant, les couples 'aléa/risque' les plus dégradants sont d'abord des couples ayant un impact plus ou moins superficiel sur l'enduit et plutôt gênant en terme visuel.

Ensuite, le fait que les travaux soient en site occupé semble avoir un impact assez élevé, il serait intéressant de savoir pourquoi.

Enfin, les couples 'aléa/risque' arrivant ensuite sont plutôt des aléas problématiques en terme structurel pour le procédé ETICS.

[22] Choix arbitraire : Etant donné qu'aucun seuil n'a été choisi pour conclure sur le fait qu'un couple soit considéré comme acceptable ou non puisque la question ici n'est pas de savoir qui est responsable de choisir ce seuil ou non et quel seuil doit être choisi mais plutôt de récolter l'information et de l'analyser.

Il est en outre important de remarquer les couples 'aléa/risque' A12 (Actions des habitants et riverains sur le bâtiment) et A10 (Opérateur non formé / non sachant) ont obtenu des scores inférieurs à 35 % pour cette pondération basée sur la performance des experts à exprimer un jugement. Cependant pour les pondérations équiprobable et basée sur l'expérience, ils ont obtenu respectivement 63 et 60 % (équiprobable) et 82 et 79 % (expérience), faisant d'eux les couples les plus préjudiciables pour le composant. Cela est notamment dû au fait que les experts les plus expérimentés ont fortement évalué ces couples. Cependant, ils n'ont pas obtenu un poids élevé lorsque celui-ci est basé sur leur performance à exprimer un jugement. Ce résultat soulève une question importante : ces experts sont-ils effectivement peu performants à exprimer un jugement et donc leur opinion nécessite-t-elle dès lors d'être tempérée ou alors est-il intéressant d'utiliser plusieurs types de pondération afin de comparer les résultats ? En effet, si le questionnaire de calibration n'est pas suffisamment approprié au regard des variables d'intérêts qui nous intéressent, alors la pondération calculée au regard de la performance des experts ne peut être considérée comme juste et donc peut être remise en question.

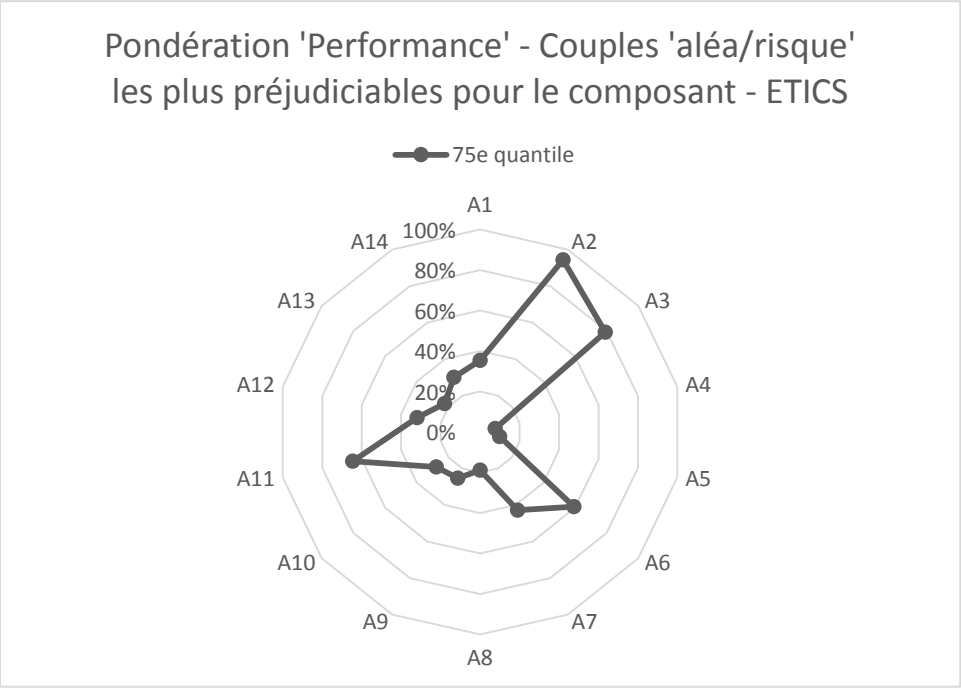


Figure 11 : Diagramme radar présentant les aléas les plus préjudiciables pour le composant ETICS pour le 75e quantile pour la pondération des experts au regard de leur performance à exprimer un jugement

Enfin il est intéressant de comparer ces résultats à ceux obtenus pour l'impact des couples 'aléa/risque' sur la performance globale du bâtiment (*cf.* Tableau 19 et Figure 12). Bien qu'il soit compliqué d'en faire une bonne comparaison étant donné que les impacts n'ont pas été recueillis de la même manière auprès des experts (sur le composant : distribution de probabilités, sur le bâtiment : impact min/max), d'où la préconisation de n'utiliser que des distributions de probabilité pour l'ensemble des données à récolter.

Ainsi les couples ‘aléa/risque’ les plus dégradants pour l’impact maximum (le plus préjudiciable) pour la performance globale du bâtiment sont :

- A10 (0,821) : Opérateur non formé / non sachant ;
- A14 (0,821) : Aléas non prévus ;
- A9 (0,475) : Défaut de conception (mauvais calepinage, …) ;
- A8 (0,474) : Défaut d’exécution – Liaison avec l’isolant au support assurée par adhérence ou fixations mécaniques non parfaitement assurées
- A12 (0,342) : Actions des habitants, riverains

Les suivants ont un score inférieur à 0,300.

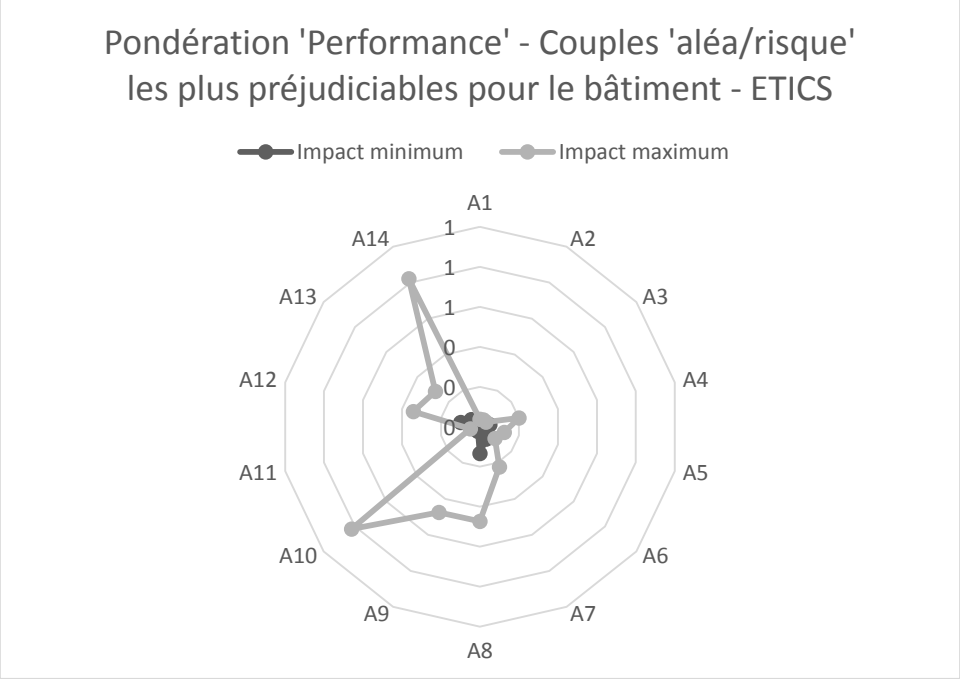


Figure 12 : Diagramme radar présentant les aléas les plus préjudiciables pour la performance du bâtiment pour l’impact des couples ‘aléa/risque’ maximum rencontrés par les experts dans le cas de l’ETICS pour la pondération des expert au regard de leur performance à exprimer un jugement

Dans un premier temps apparaissent les couples A10 et A14 qui n’apparaissaient pas précédemment pour l’impact des couples ‘aléa/risque’ sur le composant.

Les couples A10 et A14 apparaissent comme les plus préjudiciables avec un score élevé et quasiment deux fois plus important que les aléas arrivant ensuite.

Le fait que le couple A10 (opérateur non formé / non sachant) apparaisse comme l'un des deux couples les plus préjudiciables est cohérent avec ce que la communauté travaillant avec des ETICS peut penser et exprimer.

Cependant le fait que le couple A14 (aléas non-prévus) apparaisse également comme l'un des couples les plus dégradants pour le bâtiment est une information très intéressante :

- D'une part, cela met en évidence qu'il est nécessaire de prendre en compte l'incertain en introduisant ce couple ;

- D'autre part, cela met en évidence le fait qu'un ou plusieurs couple(s) 'aléa/risque' n'ont probablement pas été identifiés et qu'il est nécessaire de les identifier.

Enfin, les couples suivants A9 et A8 concernent respectivement un défaut de conception et un défaut d'exécution et n'ont pas un impact important pour le composant, alors qu'ils peuvent au regard du seuil choisi avoir un impact jugé important à l'échelle du bâtiment.

L'analyse des résultats faite ici est une analyse générale, il est également intéressant de faire une analyse basée sur un jeu de pondération reflétant les performances souhaitées pour un bâtiment donné afin d'avoir une indication sur l'intérêt de mettre en œuvre ce composant au regard de la performance souhaitée pour le bâtiment (*cf. PARTIE 3 : CHAPITRE 4 : I.1.a*).

D'un point de vue opérationnel, ce cas d'étude permet de constater :

- L'intérêt d'introduire un couple 'aléa/risque' permettant de prendre en compte l'incertain ;

- La nécessité de laisser la possibilité aux experts d'indiquer et évaluer des couples non identifiés au préalable pour faire ressortir des couples préjudiciables oubliés ou émergeants ;

- L'intérêt d'une telle méthode afin d'avoir une approche systémique, globale sur l'évaluation des composants et non plus uniquement centrée sur l'énergie et l'environnement ;

- La nécessité de solliciter un plus grand nombre d'experts afin qu'un plus grand nombre d'experts obtiennent une pondération non nulle, voire non négligeable lors de l'estimation de leur capacité à exprimer un jugement ;

- La nécessité de choisir au mieux les variables de calibration (proches des variables d'intérêts) pour s'assurer que la pondération basée sur la performance de l'expert à exprimer des jugements permette effectivement d'obtenir des données les plus proches de la réalité dans la mesure du possible ;

- La nécessité de demander l'information sous forme de distribution de probabilités pour l'ensemble des données à récolter afin de pouvoir notamment comparer les données entre elles.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats issus de l'expérimentation sur un composant largement diffusé, l'isolation thermique par l'extérieur sous enduit, communément appelé ETICS, de la méthode (processus préliminaire et principal par conséquent) sont présentés. Cette expérimentation a permis d'une part d'avoir une meilleure idée de la prise de risque associée à ce procédé en identifiant notamment que les indicateurs de performance les plus sensibles sont liés aux cibles de performance 'qualité d'usage', 'coût global' et 'sécurité d'usage'. En identifiant également que le procédé est dégradé principalement par des couples 'aléa/risque' ayant un impact direct sur le composant (comme les aléas 'Développement de micro-organismes sur la finition de l'enduit mince' ou de types 'Défaut d'exécution ponctuel') tandis que la performance du bâtiment peut potentiellement être principalement dégradée par l'aléa 'Opérateur non formé / non sachant' et l'aléa 'Aléas non prévus' permettant de prendre en compte l'incertain et mettant en exergue le fait que certains couples 'aléa/risque' n'ont pas été identifiés alors qu'ils auraient dû l'être. Enfin l'expérimentation de la méthode sur l'ETICS a permis de faire plusieurs constats aussi bien sur des points positifs de la méthode que sur des points de vigilance et/ou à améliorer. Ces points seront précisés dans le chapitre 3.

Dans le chapitre suivant sont présentés les résultats pour l'expérimentation de la méthode sur le procédé innovant : Panneau Isolant sous Vide.

CHAPITRE 2 : RESULTATS DU CAS D'ETUDE - COMPOSANT INNOVANT – PANNEAU ISOLANT SOUS VIDE (PIV)

Le second cas d'étude a été choisi pour deux raisons, c'est un composant de construction :

- Innovant ;
- Pour lequel un projet de recherche l'Annex 65 (2014-2017) – Long-Term Performance of Super-Insulation in Building Components & Systems' était en cours pendant la durée de ce doctorat. Il s'agit d'un projet de l'International Energy Agency (IEA) dans le cadre du programme Energy in Buildings and Community (EBC), qui traite notamment des panneaux isolant sous vide (PIV). Plusieurs chercheurs et industriels travaillant directement sur les PIV y contribuent. Ainsi ce projet de recherche constitue d'une part une opportunité d'être en relation avec plusieurs personnes pouvant contribuer à l'expérimentation de la méthode et d'autre part il offre l'occasion de contribuer via les résultats de l'expérimentation de la méthode sur les PIV à un projet de recherche international.

Dans un premier temps, ce composant de construction est décrit d'un point de vue technique, puis le déroulement de la méthode, processus préliminaire et secondaire, est exposé avec les résultats associés. Enfin une conclusion sur les résultats obtenus est proposée permettant également de conclure quant à l'expérimentation de la méthode.

I. Principe du Panneau Isolant sous Vide - PIV

Les Panneaux Isolant sous Vide, PIV, sont une nouvelle génération d'isolants possédant une très faible conductivité thermique (environ 7 $W.m^{-1}.K^{-1}$) qui pour une résistance équivalente à un isolant standard présente donc une épaisseur beaucoup plus faible [EDF, 2016] permettant ainsi de réduire la perte de surface habitable lors d'une pose en intérieur. Cependant le coût d'un tel isolant est plus élevé. Cet isolant est principalement utilisé en isolation par l'intérieur en France et en Europe. Mais il peut également être posé par l'extérieur (notamment au Japon).

En revanche il nécessite des précautions d'emploi particulières[23]. Il est fragile et ne peut être ni découpé, ni percé pour ne pas dégrader la performance de l'isolant en dégradant l'étanchéité à l'air de l'isolant.

Le PIV est constitué d'un noyau poreux dans lequel est fait le vide (*cf.* Figure 12). Ce noyau poreau également appelé matériau âme est composé d'un matériau inerte qui est peu conducteur ainsi que d'un produit permettant de bloquer la conduction et le rayonnement.

Un film de protection étanche entoure le noyau permettant d'empêcher la vapeur d'eau de pénétrer. Ce film est réfléchissant et est généralement constitué d'aluminium.

[23] Ce paramètre a renforcé l'intérêt pour le test de la méthode sur ce composant innovant

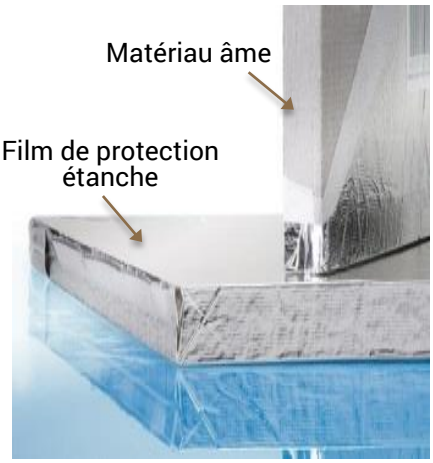


Figure 13 : Ensemble des composants de base constituant un PIV (source : Va-Q-Tec)

II. Résultats – composant innovant : PIV

II.1. Processus préliminaire

Comme cela a été mentionné précédemment le processus préliminaire permet d'une part de définir la performance globale attendue pour un bâtiment et d'autre part de déterminer le processus à suivre pour exécuter la méthode de manière optimale.

a. Etape A : Construire la famille d'indicateurs de performance

La construction de la famille d'indicateurs de performance a été détaillée dans le chapitre précédent (*cf.* CHAPITRE 1 : II.1.a ci-dessus). Cette famille étant la même lors de l'expérimentation avec un composant largement diffusé ou avec un composant innovant, toutes les informations se trouvent donc dans le paragraphe susmentionné.

b. Etape B : Choisir le processus à suivre

Cette étape est primordiale pour déterminer le processus à suivre pour le composant PIV.

i. Le composant étudié est-il largement diffusé ?

Afin d'expérimenter la méthode également sur un composant de construction innovant, le choix de s'orienter sur le produit de construction PIV a été fait puisque d'une part, c'est un composant encore peu diffusé dans le secteur du bâtiment, et que d'autre part, le CSTB est porteur du projet de recherche 'Annex 65 (2014-2017) – Long-Term Performance of Super-Insulation in Building Components & Systems'.

Choisir le produit de construction PIV comme composant innovant conduit à répondre non à la première question préliminaire permettant de déterminer le processus à suivre : le composant est-il largement diffusé ?

Dès lors, la réponse non oriente vers le processus secondaire pour étudier le PIV.

II.2. Processus secondaire : un produit innovant – PIV

Puisque le PIV est un produit peu diffusé, le processus secondaire est celui expérimenté pour ce composant de construction. Ainsi dans un premier temps, un panel d'experts est sélectionné contribuant ensuite à l'identification des couples 'aléa/risque' et d'une première estimation à titre indicatif de l'influence du composant intégré sur la performance globale du bâtiment.

a. Etape I : Sélectionner le panel d'experts

La sélection du panel d'experts a été faite via deux voies principales :

- Un Groupe d'Echange sur la Super Isolation (GEsSI) qui étudie notamment les PIV (experts nationaux) ;
- Le groupe d'experts de l'Annex 65.

Le panel d'experts est donc composé de spécialistes français et étrangers, de chercheurs et d'industriels principalement. Puisque le PIV est un composant de construction innovant, une des difficultés est d'avoir un panel d'experts représentatif de l'ensemble des métiers de la construction et ce sur tout le cycle de vie. Dès lors, l'essentiel est de constituer un panel d'experts le plus représentatif au regard de l'implantation du composant dans le cycle de vie du bâtiment au moment de l'étude. En effet, le processus secondaire est un processus exploratoire permettant d'accumuler des données pour ensuite revenir au processus principal dès lors que le composant se généralise dans le milieu de la construction.

Après avoir sollicité environ 50 personnes par le biais du GEsSI et 50 personnes par le biais de l'Annex 65, soit un total de 100 personnes, 9 personnes ont finalement constitué le panel d'experts PIV, ce qui représente 9 % des personnes sollicitées.

Le panel d'experts est constitué de :

- 1 chercheur ;
- 1 doctorant ;
- 1 chef de vente et de marketing d'un industriel ;
- 1 maître d'œuvre d'une entreprise de distribution et pose de solution isolante thermique ;
- 1 manager de certification d'un industriel ;
- 1 responsable marketing d'un industriel ;
- 1 chercheur en R&D d'un industriel ;
- 1 instructeur d'évaluation du CSTB ;

– 1 ingénieur expertise du CSTB.

Ce panel d'experts se situe plutôt en amont du cycle de vie du bâtiment sur les étapes conception, fabrication, mise en œuvre, voire mise en service et exploitation par l'intermédiaire du maitre d'œuvre si il y a un suivi. Cependant, un certain nombre de métiers de la construction, dont ceux liés à la maitrise d'ouvrage ne sont pas représentés. Pour ce travail plutôt à visée exploratoire, cela ne représente pas un frein et constitue un point de départ pour l'identification des couples 'aléa/risque'.

b. Etape II : Identifier les couples 'aléa/risque'

Une fois le panel d'experts identifié, un questionnaire est créé afin que les experts y contribuent permettant de ce fait l'identification des couples 'aléa/risque'.

i. Création d'un questionnaire

A l'instar de l'étape de création de la matrice d'aléas pour le processus principal (*cf.* PARTIE 3 : CHAPITRE 1 : II.2.d), le défi de cette étape est de créer un questionnaire le plus ergonomique et intelligible pour l'ensemble des experts, chacun ayant sa propre vision, et qui soit également facilement exploitable par la suite.

Le questionnaire a été créé ici encore sur un fichier Excel. Il a été créé en Français, puis traduit en anglais pour les experts non francophones. Ce fichier comporte quatre onglets :

– Instruction : cet onglet présente brièvement le cadre dans lequel s'intègre la recherche et détaille les instructions d'utilisation du fichier Excel et du remplissage de l'onglet questionnaire ;

– Présentation : cet onglet permet de présenter plus précisément le projet de recherche ;

– Echelle : cet onglet détaille l'ensemble des indicateurs de performance, ainsi que l'échelle utilisée pour chacun, les échelles étant basées sur le même principe (*cf.* PARTIE 3 : CHAPITRE 1 : II.1.a).

– Questionnaire : cet onglet contient le questionnaire qui se présente sous forme de matrice et qui est à compléter avec les couples 'aléa/risque' que l'expert a rencontré associés au PIV ainsi qu'une estimation de l'impact de ces couples sur les indicateurs de performance et ce à titre indicatif. Ce que contient cette matrice a été entièrement détaillé dans la partie précédente (*cf.* PARTIE 2 : CHAPITRE 2 : III.2.a) ;

ii. Contribution des experts au questionnaire

Les experts sollicités ont reçu dans leur langue le questionnaire et ont pu y répondre soit :

– Avec mon aide sous forme d'entretien en personne (lors des workshops notamment pour les experts sollicités dans le cadre de l'Annex 65) ou par téléphone ;

– Par eux même, avec une assistance téléphonique de ma part.

En moyenne, les experts ont eu besoin de 15 min à 1 h environ pour y contribuer. Le temps de contribution n'étant pas représentatif de la qualité de leurs réponses.

c. Etape III : Estimer l'influence du composant intégré

Lorsque le panel d'experts a contribué au questionnaire, la question à se poser au préalable est de savoir si oui ou non le recueil de données est suffisant, ensuite les données récoltées peuvent être analysées afin de proposer une première estimation de l'influence du composant intégré sur la performance globale du bâtiment.

i. Le recueil de données est-il suffisant ?

Dans notre cas, nous nous étions fixés un pourcentage de 10 % d'experts participant à l'expérimentation au regard du nombre d'experts contactés au préalable lors de la constitution du panel. Aussi avec 9 experts, le panel représente 9 % des personnes identifiées pour expérimenter le processus secondaire de la méthode.

Bien qu'un panel de 9 experts reste limité pour obtenir des informations fines, nous avons jugé que cela était suffisant pour mener à bien l'expérimentation de la méthode. Cependant, les résultats issus des analyses sont à prendre avec précaution.

ii. Analyse des données

Cette étape d'analyse des données étant déjà réalisée pour le processus principal, cette étape a été plus facile à aborder lors de l'expérimentation du processus secondaire. Dans ce cas, l'information souhaitée se résume à :

- Quels sont les couples 'aléa/risque' identifiables dans un premier temps et lesquels sont les plus cités ? ;

- Quels sont les indicateurs les plus sensibles aux couples 'aléa/risque' ? Autrement dit ceux qui sont les plus impactés par le composant de construction. Ainsi au regard des performances souhaitées pour un bâtiment, cette information aide à déterminer au préalable quels sont les indicateurs les plus susceptibles d'être dégradés par le composant.

Cette fois-ci, les données n'ont été pondérées que de manière équiprobable. Les experts ayant relativement le même nombre d'expériences au regard de ce composant innovant. En outre, il existe trop peu de données pour permettre de créer un questionnaire de calibration, ou alors cela nécessiterait de trouver un autre composant de construction plutôt largement diffusé (et pour lequel des valeurs de référence sont disponibles) mais assez proche du composant innovant étudié pour créer le questionnaire de calibration. Dans le cas du PIV, il n'existe pas de composant à ma connaissance qui soit suffisamment similaire pour faire figure de référence.

iii. Identification des couples 'aléa/risque'

Lorsque les experts remplissent les questionnaires, ils ont chacun leur vision et leur manière d'expliciter ce qu'ils ont expérimenté lors de l'intégration de PIV. En outre, les réponses sont en français et en anglais. Aussi un gros travail de traduction, compréhension, tri et classification est à faire afin de pouvoir dégager une première liste de couple 'aléa/risque'. Certains sont cités par plusieurs experts, parfois en des termes similaires, parfois non, d'autres sont cités par deux, voire un seul expert, ce qui n'est pourtant pas une raison suffisante pour les exclure. La méthode est ici appliquée pour des composants innovants, dont la connaissance reste assez limitée puisque le composant est encore peu mis en œuvre et qu'il existe peu de retour d'expériences, aussi il est préconisé de n'écarter aucun couple 'aléa/risque', cela permet d'avoir une vue large et de ne pas passer par à côté de couple qui peuvent s'avérer avec le temps très préjudiciable pour le composant et/ou la performance globale, par conséquent le bâtiment.

Dans le cas du PIV, 13 couples 'aléa/risque' ont été identifiés à partir des retours d'expérience des 9 experts. Ils ont proposé chacun entre 3 et 8 couples 'aléa/risque'. Ce qui fait en tout 44 couples obtenus via le questionnaire. Une fois l'information traitée et triée, une liste de 16 couples 'aléa/risque' a pu être établie avec l'ajout du dix-septième couple 'aléa/risque' pour prendre en compte l'incertain lorsque le composant passe au processus principal.

Le Tableau 21 présente la liste des 16 couples 'aléa/risque' issus du traitement et du tri de l'information obtenue auprès du panel d'experts. La dernière ligne de ce tableau répertorie le nombre de couple 'aléa/risque' proposé par les experts lors de cette étape d'identification. Ce nombre ne peut dépasser 9 puisque le panel d'experts est constitué de 9 personnes. Cela donne une première indication sur l'aléa, à savoir le nombre de personnes l'ayant recensé. En revanche, cela ne donne pas d'information sur le fait qu'un couple 'aléa/risque' est plus ou moins préjudiciable ou fréquent.

Tableau 21 : Identification des couples 'aléa/risque' après traitement et tri de l'information obtenue via le questionnaire auprès du panel d'experts 'PIV'

Id	Aléa	Risque	Conséquences	Bonnes pratiques proposées	Nb de fois proposé
A1	Défaut de conception (Soudure/joint non adapté, mauvais choix du film, mauvais choix du matériau âme calepinage, ….)	Panneau mal conçu (panneau trop grand, trop petit, film et/ou matériau âme non adapté, de mauvaise qualité, ...) Ponts thermiques linéiques (PTL) dus aux liaisons (liaisons Plancher bas/mur (ou refend) - Plancher courant/mur - Toiture/mur (ou refend) - Mur/mur (ou refend) - Encadrement de baies/mur) Condensation entre le panneau et des composants connexes Impossibilité de poser les panneaux : tout ou en partie	Réduit la durabilité/longévité du panneau Si système d'isolation couplé à d'autres isolants/matériaux -> dégradation de la qualité d'adhésion d'autres matériaux sur le film Dégradation de la résistance thermique de la paroi Dégradation de la performance thermique de l'enveloppe du bâti Augmentation de la consommation d'énergie Problème d'humidité/condensation possible Mauvais confort thermique	Contrôle de qualité du panneau et notamment du film (en sortie d'usine et sur site) Former les opérateurs de MEO Choix de matériaux âme et film de qualité Formation pour les architectes et ingénieurs (bureau d'étude)	9
A2	Rupteur de pont thermique prescrit lors de la conception n'est pas compatible avec les panneaux PIV	L'épaisseur de l'isolation par l'intérieur inférieure à l'épaisseur du rupteur	Dégradation de la résistance au feu du mur isolé en intérieur Dégradation de l'isolation acoustique	Vérifier la compatibilité des rupteurs thermiques avec les panneaux PIV en MEO par l'intérieur dans les documents d'avis techniques	1
A3	Présence lors de la mise en œuvre d'une singularité sur le mur support non prévue au moment de l'élaboration du calepinage (prise électrique, fenêtre, porte, radiateur, …)	Le dimensionnement prévu en conception des panneaux PIV est incompatible avec le mur support existant	Réduction du niveau d'isolation de la paroi localement -> ponts thermiques, …		1

Id	Aléa	Risque	Conséquences	Bonnes pratiques proposées	Nb de fois proposé
A4	Mauvaise planéité du mur support	Création d'espace d'air important entre les panneaux	Réduction du niveau d'isolation de la paroi localement -> ponts thermiques, …		1
A5	Défaut de production (Soudure/joint mal fait, ...)	Panneau endommagé (micro-percement dans les soudures, transferts d'air et d'humidité à travers la soudure, …)	Réduit la durabilité/longévité du panneau Si système d'isolation couplé à d'autres isolants/matériaux -> dégradation de la qualité d'adhésion d'autres matériaux sur le film Dégradation de la résistance thermique de la paroi Dégradation de la performance thermique de l'enveloppe du bâti Augmentation de la consommation d'énergie Problème d'humidité/condensation possible Formation de moisissures Mauvais confort thermique	Contrôle de qualité du panneau et notamment du film (en sortie d'usine et sur site)	5
A6	Défaut de transport des panneaux	Panneau endommagé (percement, enveloppe dégradée, perte de vide, …)	Réduit la durabilité/longévité du panneau Ponts thermiques Dégradation de la résistance thermique de la paroi Dégradation de la performance thermique de l'enveloppe du bâti Augmentation de la consommation d'énergie Problème d'humidité/condensation possible Formation de moisissures Mauvais confort thermique	Guide de transport, usage des PIV / information sur le colis de transport Former les transporteurs et personnes impliquées dans le transport de PIV	3

Id	Aléa	Risque	Conséquences	Bonnes pratiques proposées	Nb de fois proposé
A7	Défaut de stockage des panneaux	Panneau endommagé (percement, enveloppe dégradée, perte de vide, …)	Réduit la durabilité/longévité du panneau Ponts thermiques Dégradation de la résistance thermique de la paroi Dégradation de la performance thermique de l'enveloppe du bâti Augmentation de la consommation d'énergie Problème d'humidité/condensation possible Formation de moisissures Mauvais confort thermique	Guide sur le stockage, usage des PIV / information sur le colis concernant le stockage Stocker à l'abri des intempéries et de risque de dégradation mécanique Protéger le PIV lors du stockage Former les personnes impliquées dans le stockage de PIV	5
A8	Défaut de manutention et de MEO des panneaux	Panneau endommagé (percement, enveloppe dégradée, perte de vide, …)	Réduit la durabilité/longévité du panneau Dégradation de la résistance thermique du panneau jusqu'à 400 % Dégradation de la résistance thermique de la paroi Dégradation de la performance thermique de l'enveloppe du bâti Augmentation de la consommation d'énergie Problème d'humidité/condensation possible Formation de moisissures Mauvais confort thermique Augmentation du coûts de MEO (Nécessité de remplacer les panneaux lors de la MEO si panneaux endommagés détectés pendant la MEO)	Former les opérateurs de MEO et les ingénieurs (manutention, identification des panneaux endommagés, MEO, …) Guide d'installation fourni par les industriels notamment Suivi de chantier (via fiches, …) Contrôle de qualité sur site des panneaux via outils	8

Id	Aléa	Risque	Conséquences	Bonnes pratiques proposées	Nb de fois proposé
A9	Opérateur non formé	Panneau endommagé (percement, enveloppe dégradée, perte de vide, …) Mauvaise MEO des panneaux et du système d'isolation entier	Réduit la durabilité/longévité du panneau Dégradation de la résistance thermique du panneau jusqu'à 400 % Dégradation de la résistance thermique de la paroi Dégradation de la performance thermique de l'enveloppe du bâti Augmentation de la consommation d'énergie Problème d'humidité/condensation possible Formation de moisissures Mauvais confort thermique Augmentation du coûts de MEO (Nécessité de remplacer les panneaux lors de la MEO si panneaux endommagés détectés pendant la MEO)		2
A10	Défaut d'exécution : pose sans pare-vapeur	Condensation inter-panneaux	Réduit la durabilité/longévité des panneaux Développement de bactéries, moisissures dégradant les panneaux Dégradation de la qualité de l'air	Respecter les documents de mise en œuvre	1
A11	Défaut d'exécution : Trop de chaleur à la soudure des membranes en toiture terrasse	Dégradation du film des panneaux	Réduit la durabilité/longévité des panneaux Dégradation de la résistance thermique Augmentation du coût de MEO (Nécessité de remplacer les panneaux lors de la MEO si panneaux endommagés détectés pendant la MEO)	Utiliser des panneaux PIV dédiés à l'usage en toiture terrasse	1

Id	Aléa	Risque	Conséquences	Bonnes pratiques proposées	Nb de fois proposé
A12	Défaut d'exécution : Installation sous la pluie en toiture terrasse	Panneaux enfermés dans l'eau entre les membranes d'étanchéité	Réduit la durabilité/longévité des panneaux	Respecter les documents de mise en œuvre Utiliser des panneaux PIV dédiés à l'usage en toiture terrasse	1
A13	Non-respect du plan de calepinage	Ponts thermiques linéiques (PTL) dus aux liaisons (liaisons Plancher bas/mur (ou refend) - Plancher courant/mur - Toiture/mur (ou refend) - Mur/mur (ou refend) - Encadrement de baies/mur) Condensation entre le panneau et des produits/procédés connexes Impossibilité de poser tout ou en partie les panneaux			1
A14	Pas de transmission de l'information : 'Isolation par PIV' lors de changement de propriétaires	Usage des parois isolées non adapté (percement du mur pouvant entrainer un percement des panneaux)	Réduit la durabilité/longévité du panneau Dégradation de la résistance thermique du panneau jusqu'à 400 % Dégradation de la résistance thermique de la paroi Dégradation de la performance thermique de l'enveloppe du bâti Augmentation de la consommation d'énergie Problème d'humidité/condensation possible Formation de moisissures Mauvais confort thermique	Certificat accompagnant le changement de propriétaire via le notaire	1

Id	Aléa	Risque	Conséquences	Bonnes pratiques proposées	Nb de fois proposé
A15	Défaut d'usage : Usage des parois isolées non adapté (percement du mur)	Panneau endommagé (percement, perte de vide, comportement au feu dégradé, ...)	Réduit la durabilité/longévité du panneau Ponts thermiques Dégradation de la résistance thermique de la paroi Dégradation de la performance thermique de l'enveloppe du bâti Augmentation de la consommation d'énergie Problème d'humidité/condensation possible Formation de moisissures Mauvais confort thermique Risque de comportement au feu dangereux pour la sécurité des usagers et du bâtiment	Si isolation intérieure : protection des panneaux par une couche de 4 ou 5 cm de produits de construction "durs"	4
A16	Défaut de dépose des panneaux	Panneau endommagé (percement, perte de vide)	Impossibilité de les réutiliser	Former à la dépose des panneaux	1
A17	Aléas incertains				1[24]

[24] Ici bien que cet aléa ne soit pas mentionné par les experts mais ajouté et ce dès le questionnaire d'identification des couples 'aléa/risque', la valeur '1' signifie qu'un expert sur les 9 a renseigné cet aléa pour les impacts des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance contrairement aux autres (puisque dans le cas du composant innovant, cela est facultatif).

iv. Identification des indicateurs les plus sensibles aux couples 'aléa/risque'

De même que pour le processus principal, l'identification des indicateurs les plus sensibles aux impacts des couples 'aléa/risque' a été menée. La médiane des 9 experts a été calculée pour chaque indicateur de performance en prenant la somme des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance (*cf.* Tableau 7 – PARTIE 2 : CHAPITE 2 : II.5.c).

Le tableau en Annexe I résume les médianes obtenues pour chaque indicateur avec une pondération équiprobable pour combiner les données des experts. Tandis que le Tableau 22 est un extrait du tableau en Annexe J donnant le classement de la sensibilité des indicateurs.

Tableau 22 : Classement de la sensibilité des indicateurs avec une combinaison des données pour une pondération équiprobable - PIV

Indicateur	Sensibilité
I22	1,714
I2	1,714
I23	1,143
I18	0,571
I24	0,286
I7	0,143

A la vue du Tableau 22, plusieurs remarques peuvent être faites :

1. La première remarque qui peut être faite dans le cas du PIV est que, contrairement au composant largement diffusé étudié précédemment où presque tous les indicateurs sont impactés par les couples 'aléa/risque' associés à ce procédé, seulement 6 indicateurs de performance sur les 30 sont impactés et seulement 3 cibles (qualité d'usage, coût global et énergie & environnement) sur les 6. Cependant il faut garder à l'esprit que les données estimées par les experts sont plutôt des valeurs a priori puisque le composant est encore peu mis en œuvre et que les experts du panel ont encore peu de retour d'expériences à disposition.

2. La cible de performance la plus sensible est celle liée à l'Energie & Environnement (avec les indicateurs I22 (Performance thermique de l'enveloppe), I23 (Consommation d'énergie primaire totale) et I24 (Changement climatique)) alors que le composant étudié ici est un composant d'isolation dont l'intérêt principal est d'améliorer cette cible de performance ce qui amène à s'interroger sur la performance du composant ;

3. La deuxième cible la plus impacté est la cible Qualité d'usage avec les indicateurs I2 (Confort hygrothermique) et I7 (Adaptabilité au comportement des utilisateurs). Le fait que l'indicateur confort hygrothermique soit fortement impacté est cohérent avec le fait que l'indicateur Performance thermique de l'enveloppe soit lui aussi fortement impacté. En outre, il apparait également logique que l'indicateur Adaptabilité au comportement des utilisateurs soit fortement impacté, parce que le PIV est sensible

au percement notamment (voyant sa résistance thermique fortement diminuée) et une des craintes entendues à plusieurs reprises est que l'utilisateur du bâtiment peut en perçant les murs (qui est une pratique normale et courante) également percer le panneau malgré les précautions prises. Par ailleurs cet indicateur pourrait expliquer pourquoi les indicateurs I22 et I2 sont fortement impactés par les aléas.

4. Enfin la troisième et dernière cible impactée est le Coût global avec l'indicateur I18 Coût en exploitation qui contient notamment le coût de maintenance et reste donc cohérent avec les points précédents et la crainte que le panneau soit notamment percé ou dégradé et où la décision est prise qu'il soit remplacé.

III. Conclusion sur les résultats

En premier lieu, ici encore l'expérimentation de la méthode sur le composant innovant PIV soulève des interrogations quant à la pertinence des conclusions qui sont tirées puisque :

- D'une part, le panel d'experts est là encore petit et en outre les experts n'ont dans ce cas-là pas pu être pondérés au regard de leur performance à exprimer un jugement ;

- D'autre part, il n'existe pas de seuil permettant de conclure si un aléa est jugé acceptable ou non ou a minima un seuil permettant de conclure si un aléa est jugé préjudiciable pour le composant, ainsi que pour le bâtiment. Aussi, la question à se poser ici est qui est en mesure de choisir ce seuil ? Les assurances, l'Agence Qualité Construction, les Groupes Spécialisés en charge de l'évaluation des composants de construction ou quel(s) autre(s) acteur(s) de la construction ?

Dans ce cas-là, seule une pondération équiprobable a été utilisée, donc la conclusion proposée ici est à prendre avec précaution pour les raisons ci-dessus et est faite au regard de cette pondération.

En outre, il n'est possible de conclure que sur la sensibilité des indicateurs au regard de l'impact des couples 'aléa/risque' (*cf.* Tableau 22 et Figure 14), puisque les couples ont pu être seulement identifiés dans le cas du processus secondaire pour les composants innovants et que l'impact n'est pas demandé sur le composant en lui-même.

Les indicateurs les plus sensibles au regard de l'impact maximum (le plus préjudiciable) des couples 'aléa/risque' identifiés pour le PIV sont les couples suivants :

- I22 (1,714) : Performance thermique de l'enveloppe (Energie & Environnement) ;

- I2 (1,714) : Confort hygrothermique (Qualité d'usage) ;

- I23 (1,143) : Consommation d'énergie primaire totale (Energie & Environnement) ;

- I18 (0,571) : Coût en exploitation (Coût global) ;

- I24 (0,286) : Changement climatique (Energie & Environnement) ;

- I7 (0,143) : Adaptabilité au comportement des utilisateurs.

Les autres indicateurs ayant obtenus un score nul.

La première information qui ressort ici est que la cible concernant les performances énergétique et environnementale est la plus représentée. Aussi, une question est immédiatement soulevée, à savoir, les experts interrogés expriment-ils ici leur inquiétude vis-à-vis de cet isolant et du fait que bien qu'il ait de très bonnes performances thermiques, certains des couples 'aléa/risque' qui ont été identifiés puissent fortement dégrader ces performances. D'autant plus que l'un des indicateurs les plus sensibles concerne le confort hygrothermique de la cible Qualité d'usage venant renforcer cette impression.

Le second constat est que les 6 indicateurs impactés semblent fortement corrélés entre eux, ce qui amène à s'interroger sur le fait que les données soit effectivement bien estimées a priori par les experts et sembleraient plutôt exprimer les craintes a priori des experts plutôt que la réalité puisqu'il existe encore peu de retour d'expériences sur ce composant innovant car peu mis en œuvre de nos jours. Ce qui amène également à s'interroger sur la pertinence de recueillir ces données a priori. Sont-elles réellement source d'information ou non ? Ne sont-elles pas trop empruntes de biais cognitifs liés aux domaines de la construction et aux différents métiers représentés par les experts du panel ? Aussi cela semble remettre en question l'intérêt d'évaluer l'impact des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance pour un composant innovant.

En outre, dans le cas de ce composant d'isolation innovant seulement six indicateurs sur trente sont impactés dont trois beaucoup plus fortement, tandis que pour le composant d'isolation largement diffusé, la moitié des indicateurs sont impactés. Cette différence entre les deux cas d'études ayant le même but permet déjà de montrer que ce genre d'analyse donne des résultats très différents d'un composant à un autre au sein d'une même catégorie. Notamment parce que les données recueillies pour le composant innovant semblent être plutôt des données a priori. Aussi les experts se sont-ils focalisés sur leurs craintes pour ce composant innovant occultant les autres indicateurs de performance ? Tandis que pour le composant largement diffusé, les données sont normalement basées sur leurs expériences, par conséquent normalement représentatives de la réalité et normalement moins biaisées par les craintes des experts.

Le troisième constat qui peut être fait ici est qu'une étude de ce genre peut être très pertinente pour vérifier qu'un composant améliore bien les performances pour lesquelles il est préconisé. Par ailleurs, il ressort que ce type d'étude permet de mettre en évidence des problématiques liées à un composant non évidentes au départ. En effet, la logique serait de penser qu'un composant d'isolation intégré ne dégrade pas les performances énergétiques et environnementales du bâtiment et pourtant les aléas associés à ce composant peuvent avoir cet effet de dégradation. Dès lors, cela peut permettre d'améliorer le composant innovant étudié, sa mise en œuvre, son conditionnement, son stockage, etc., afin d'anticiper, voire d'éviter les aléas ayant un impact négatif sur les performances à améliorer, et dans certains cas, si les aléas paraissent inévitables, de ne pas poursuivre le développement du dit-composant.

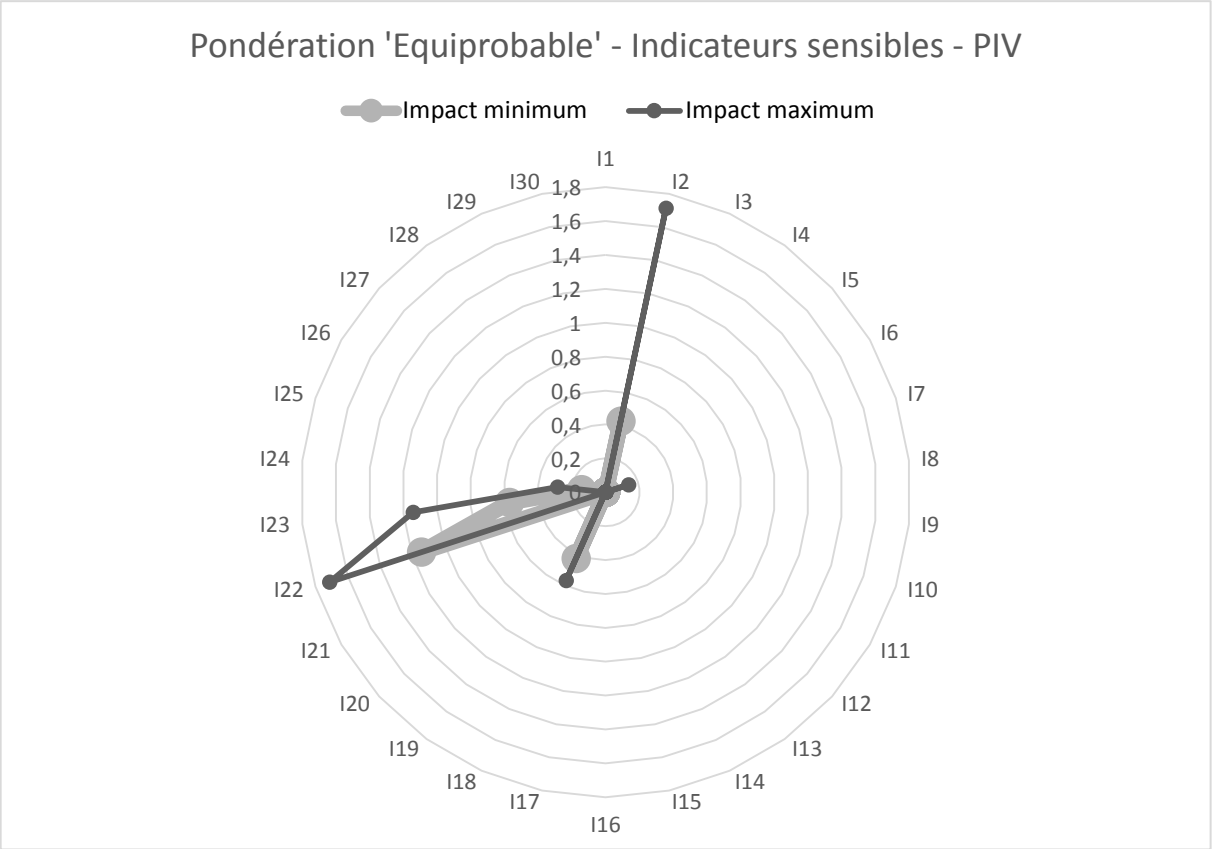


Figure 14 : Diagramme radar présentant la sensibilité des indicateurs de performance au regard de l'impact minimum et maximum des couples 'aléa/risque' pour une pondération équiprobable

D'un point de vue opérationnel, cette expérimentation du second processus sur ce cas d'étude permet principalement de s'interroger sur la nécessité d'évaluer l'impact des couples sur les indicateurs de performance. Ce processus secondaire apporte déjà suffisamment d'informations en permettant d'identifier les couples 'aléa/risque' associés au composant afin de préparer le processus principal en attendant que le composant soit suffisamment déployé pour l'appliquer. En effet, les experts sollicités pour le composant innovant ont pour la plupart peu d'expériences avec le composant du fait même que celui-ci soit innovant. Aussi estimer des impacts des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance n'est pas aisé à réaliser pour eux. En outre, il n'y a aucun moyen de s'assurer que les estimations qu'ils font sont proches de la réalité puisqu'il n'est pas possible de mettre en place la méthode classique de Cooke (1991) par exemple pour pondérer leur performance à exprimer des jugements. Aussi, concernant le processus secondaire de la méthode, il est préconisé d'utiliser ce processus dans le but unique de déterminer les couples 'aléa/risque' associés au composant innovant et d'attendre que le composant passe par le processus principal pour connaitre l'impact de ces couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance. En effet, l'identification des couples 'aléa/risque' associés à un composant de construction innovant constitue déjà une information très riche permettant à un certain nombre d'acteurs de la construction d'avoir une première information sur un composant innovant et pour lequel ce

type d'information n'existe pas encore à ce jour. Et permettant d'une part aux différents acteurs de la construction de déjà être sensibilisés avec les couples 'aléa/risque' identifiés, d'essayer de les anticiper, voire de ne pas les laisser devenir courants et d'éviter des sinistres à grande échelle. D'autre part de préparer le passage au processus principal.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats issus de l'expérimentation sur un composant innovant, le Panneau Isolant sous Vide, communément appelé PIV ou VIP pour Vacuum Insulation Pannel, de la méthode (processus préliminaire et secondaire par conséquent) sont présentés. Cette expérimentation a permis d'une part d'avoir une meilleure idée de la prise de risque associée à ce composant en permettant l'identification des couples 'aléa/risque' alors même qu'il y a peu de retour d'expériences disponible sur ce composant. Enfin l'expérimentation de la méthode sur le PIV a permis de faire un constat principal, à savoir que la force de cette méthode pour un composant innovant réside dans l'identification des aléas et risques associés de manière méthodique et très en amont alors que le composant est encore peu mis en œuvre.

Dans le prochain chapitre, il s'agit de discuter l'apport de la méthode au domaine de la construction, sont également discutés les points forts, les limites de la méthode, ainsi que les perspectives en vue de son amélioration. Enfin dans un dernier temps les bonnes pratiques, risques et apprentissages apparus lors de l'expérimentation sont eux aussi discutés.

CHAPITRE 3 : DISCUSSIONS

Ce chapitre permet de discuter de l'apport de la méthode pour le domaine du bâtiment, ainsi que les points forts et les limites de la méthode. Egalement les perspectives en vue de son amélioration. Enfin les bonnes pratiques, risques et apprentissages qui sont apparus lors de l'expérimentation.

I. La méthode, l'expérimentation et l'apport dans le domaine

La méthode proposée a pour mérite de proposer une première stratégie pour appréhender la prise de risque liée à l'intégration d'un composant de construction dans le bâtiment et son impact sur la performance globale de ce dernier et ce sur l'ensemble du cycle de vie.

En outre, l'expérimentation conduite ici a permis d'appréhender la manière dont est perçu le risque dans le domaine du bâtiment. En effet, le risque est très bien perçu d'un point de vue risque naturel et structurel notamment mais pas encore systématiquement d'un point de vue social par exemple. En outre, souvent le problème se positionne au regard du risque, qui est déjà survenu et non pas au regard de l'aléa, déclencheur du risque et sur lequel la marge de manœuvre est plus importante. Pour rappel, l'aléa ne provoque un risque que dans le cas où il rencontre sa cible (*cf.* PARTIE 1 : CHAPITRE 2 : I.1), tandis qu'une fois que le risque est survenu, la menace ou l'opportunité est déjà là. De plus, les matrices utilisées dans cette méthode sont des matrices 'aléa/impact' et non pas 'conséquences/probabilités'. Claude (2016) critique notamment les matrices 'conséquences/probabilités' sur le fait qu'elles ne permettent pas d'identifier le risque au regard des aléas, pourtant source de risque. Le choix ici a été fait de proposer des matrices 'aléa/impact' afin d'une part de déterminer les sources de risques, permettant d'agir à la source si besoin est et d'autre part d'évaluer l'impact de ces aléas sur la performance globale du bâtiment permettant de déterminer quels sont les aléas les plus préjudiciables pour la performance puisqu'il est plus facile d'intervenir à la source, donc sur l'aléa, plutôt qu'une fois que le risque est déjà survenu. D'autres critiques non développées ici sont émises à l'égard des matrices 'conséquences/probabilités' et peuvent être retrouvées dans l'article de Claude (2016).

Il reste encore du chemin à parcourir pour que l'ensemble des acteurs de la construction ait une vision commune du risque et de l'appréhension de l'incertitude. Il en est de même pour que le recueil des retours d'expériences auprès des acteurs de la construction devienne une habitude systématique et s'ancre comme pratique de l'ordre de l'habitude dans le domaine de la construction. Cela permettrait une amélioration continue aussi bien des composants de construction, des projets de construction et des bâtiments. Aussi ce genre de méthodes nécessite une formation à la culture du risque des acteurs de la construction, afin qu'elle puisse être acceptée, utilisée et pérennisée.

Cependant, un certain nombre d'acteurs de la construction, ayant des visions et bagages différents, ont accepté de contribuer à nos travaux en dégageant du temps alors même qu'aucun cas d'étude ne faisait figure d'exemple permettant de se projeter sur les intérêts de la méthode. Ainsi, l'expérimentation de cette méthode permet de constater que certains acteurs de la construction s'intéressent à l'utilisation du retour d'expériences comme outil de prédiction et d'anticipation des risques encourus. En outre d'autres projets de recherche, tel

que GRIMOIRE[25], pour lequel j'ai contribué dans le cadre de cette thèse, permettent de mettre en évidence que certains acteurs de la construction sont pour la pratique de recueils des retours d'expériences afin de l'exploiter dans une optique d'amélioration des processus dans la construction.

Afin que cela devienne une pratique pérenne, il sera probablement nécessaire de montrer en quoi cela est un atout ou une force pour chacun des acteurs de la construction, comment ils peuvent y contribuer et comment ils peuvent utiliser ce retour d'expériences. Chaque acteur de la construction peut contribuer à cette méthode en devenant expert pour un ou plusieurs composants de construction étudié via la méthode. Le chapitre suivant propose des éléments de réponse quant à l'utilisation qu'ils peuvent en faire. Bien entendu, mettre en place ce genre de culture, de vision et de méthode demande du temps, surtout si les acteurs du domaine ne sont pas prêts à s'investir dans son développement à moyen ou long terme. Il est alors nécessaire de trouver les leviers permettant de provoquer le changement et de faire évoluer la communauté vers une vision commune.

II. Discussions sur les bases théoriques de la méthode

Dans ce paragraphe sont discutés les enseignements, avantages, limites posées par la méthode proposée et mis en évidence lors des expérimentations.

En Annexe M, se trouve un tableau résumant l'ensemble des qualités, limites et perspectives de la méthode. Certaines étapes de la méthode étant similaires, elles sont traitées dans les mêmes paragraphes pour plus de clarté.

II.1. Etape A (processus préliminaire) : Construction de la famille de performance

Construire une famille de performance représentant la performance globale (environnementale, énergétique, économique et sociale) à atteindre pour le bâtiment et dont les indicateurs de performance sont pondérables au regard des objectifs souhaités en terme de performance pour un projet donné permet de :

- Formaliser la performance globale du bâtiment via des indicateurs indépendants et représentatifs des objectifs de performance à atteindre ;
- D'avoir une approche systémique pour évaluer l'impact d'un composant de construction intégré sur le bâtiment ;
- D'être adaptable au cas par cas et ainsi d'évaluer l'intégration d'un composant pour un bâtiment donné.

[25] Gestion du Retour d'Expérlence pour la Massification des Opération Intégrées[25], GRIMOIRE[25], lancé en octobre 2015 pour une durée de deux ans, l'un des 14 projets lauréats de l'appel à projet ADEME 2014-2015 « Bâtiments responsables à l'horizon 2020 »

II.2. Etape B (processus préliminaire) : Choix du processus

La méthode proposée ici est adaptable au regard de la maturité du composant de construction étudié. Bien qu'elle permette d'obtenir une information plus complète et plus fiable pour des composants largement diffusés, l'utilisation de cette méthode pour des composants innovants donne une information appréciable pour l'amélioration des composants innovants via l'identification des couples 'aléa/risque' très en amont par rapport à la maturité du composant.

II.3. Etape 1 (processus principal) & Etape II (processus secondaire) : Identification des couples 'aléa/risque'

L'identification des couples 'aléa/risque' sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment auprès de base de données existantes, de spécialistes et experts du composant étudié (qu'il soit largement diffusé ou innovant), prévue par la méthode est novatrice dans le domaine. Les processus existants, tel que la Commission Prévention Produits mis en œuvre (C2P) de l'AQC, la base de données REX BP de l'AQC également ou les bases de données assurantielles se focalisent plutôt sur le risque, notamment en terme de sinistres, pathologies et non qualité et s'attachent à déterminer l'impact du risque, tandis que le choix a été fait ici d'avoir une approche 'aléa/impact'. La méthode permet effectivement de prendre comme point de départ la source du risque, à savoir l'aléa, couplé à un risque. Ainsi pour un même aléa, plusieurs risques peuvent survenir et l'impact est évalué sur la performance globale pour le couple 'aléa/risque'.

Cependant, puisque nous nous intéressons à la réalité d'un système complexe, il existe une incertitude. Aussi, tous les couples 'aléa/impact' ne sont-ils pas recensés, puisque d'une part une incertitude existe et d'autre part, certains couples 'aléa/risque' existent mais n'ont pas été nécessairement recensés par les spécialistes ou bases de données existantes. Aussi, inévitablement, la liste des couples 'aléa/risque' ne peut être exhaustive, ni complète. Par conséquent, la méthode propose de prendre en compte l'incertitude en ajoutant à la liste de couples 'aléa/risque' un aléa représentant l'incertitude, permettant aux experts d'évaluer cette incertitude globalement au regard de l'ensemble des aléas rencontrés rarement.

II.4. Etape 2 (processus principal) & Etape I (processus secondaire) : Sélection du panel d'experts

Afin de recueillir des données les plus représentatives de la réalité et les plus fiables possibles, le panel d'experts doit être représentatif des différents métiers de l'ensemble du cycle de vie du bâtiment avec soit une vision d'ensemble, soit une vision spécialiste, ce qui permet d'évaluer l'impact du composant de construction via une approche systémique et sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. En revanche, les processus existants tel que la C2P, le REX BP ou les bases de données assurantielles se focalisent plutôt sur certaines phases comme la mise en œuvre ou l'exploitation du bâtiment.

Toutefois, pour obtenir une vision globale et systémique, il est nécessaire qu'un nombre significatif d'experts contribue. Chacun d'entre eux, ayant besoin pour un composant de

construction largement diffusé d'environ 2 à 3h et pour un composant innovant 15 min à 1h pour participer à ce recueil.

En outre, les bases de données nécessitent d'être mises à jour régulièrement avec l'apport de nouvelles données plusieurs fois par an, puisque la réalité évolue, soit grâce à la contribution de nouveaux experts, soit par une nouvelle contribution d'experts faisant déjà parti du panel et ressentant le besoin de contribuer à nouveau au regard de l'actualisation de son expérience.

Aussi, une des perspectives de la méthode est de faire des campagnes régulières de « recrutement » d'experts afin d'alimenter en continue les bases de données composants existantes.

II.5. Etape 3-1 (processus principal) : Pondération des experts

Les experts ne sont pas toujours à même d'estimer des grandeurs incertaines alors même qu'ils ont les connaissances et l'expertise dans le domaine où les données sont recherchées. Aussi, est-il indispensable de fiabiliser l'information récoltée et de déterminer la capacité des experts à estimer des grandeurs incertaines. C'est pourquoi cette étape est essentielle à la méthode. En outre, elle permet d'optimiser la manière dont les données des différents experts sont recueillies pour en obtenir une estimation de l'incertitude la plus « juste » possible.

Néanmoins, cette étape se base sur la connaissance préalable de certaines données pertinentes au regard de l'information à recueillir. Conséquemment, une difficulté survient s'il n'y a pas assez de connaissances fiables sur le composant de construction étudié, puisque ce sont sur ces données que se base la pondération des experts permettant d'optimiser l'estimation des données.

Aussi, une des pistes d'amélioration est d'affiner le questionnaire, au fur et à mesure des connaissances fiables qui peuvent être récoltées sur le composant.

II.6. Etape 3-2 (processus principal) : Construction de la base de données composant 'aléa/impact'

Le principal atout des bases de données composant 'aléa/impact' construites ici est d'avoir un retour d'expériences sur l'ensemble du cycle de vie avec une estimation de l'impact sur l'ensemble des indicateurs de performance représentant la performance globale du bâtiment (énergétique, environnementale, économique et sociale) via un panel d'experts aussi divers et varié que les métiers de la construction avec des visions allant de l'échelle du composant (spécialiste du composant), en passant par l'échelle du bâtiment (maitre d'œuvre, maitrise d'ouvrage, …) jusqu'à une vue plus générale du processus de la vie d'un bâtiment (gestionnaire de bâtiment, …).

En outre, l'utilisation de distribution de probabilités (pour chaque quantile choisi (5, 25, 50, 75, 95 par exemple) est associé l'impact du couple 'aléa/risque' sur le composant lui-même) permet à l'expert non pas d'estimer avec précision sa croyance au regard de son expérience mais plutôt d'estimer des intervalles (entre deux quantiles) pour lesquels il est certain que la probabilité que l'événement arrive [Cooke, 2014]. Et ainsi chaque expert exprime sa propre

vision du problème au regard de son expérience et qui représente une part de la réalité. Ainsi la combinaison de plusieurs dires d'experts empreints de leur capacité à estimer des grandeurs incertaines au regard des questions spécifiques de l'expertise (la pondération d'expert) permet d'avoir une vision plus globale et proche de la réalité.

Cependant, lors de la création de la méthode, le choix d'utiliser un autre type d'échelle pour estimer l'impact des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance a été fait. Cette échelle commune à l'ensemble des indicateurs allant de 1 à 5 et dont l'impact demandé est l'impact minimum et l'impact maximum du couple 'aléa/risque' rencontré par l'expert sur chaque indicateur de performance nous a paru plus simple et plus rapide pour les experts. Toutefois, ce type d'échelle ne semble pas, après expérimentation, aussi facilement exploitable que l'estimation via une distribution de probabilités qui est plus appropriée pour estimer des grandeurs en conditions d'incertitude. Aussi une amélioration majeure de la méthode préconisée ici est d'utiliser également l'estimation de l'impact (quand il existe) des couples 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance via une distribution de probabilités pour les quantiles 5, 25, 50, 75 et 95.

De plus, une autre perspective de la méthode est d'offrir la possibilité aux experts d'ajouter des couples 'aléa/risque' s'ils ressentent le besoin d'exprimer des couples non identifiés dans la matrice 'aléa/impact'. En effet, rendre cela possible permet de prendre en compte des risques émergents et d'être dans une logique d'actualisation des bases de données au regard de l'évolution de la réalité.

II.7. Etape 4 (processus principal) & Etape III (processus secondaire) : Evaluation de l'impact du composant sur la performance globale du bâtiment

L'évaluation de l'impact d'un composant de construction intégré sur la performance globale du bâtiment sur tout son cycle de vie se fait via trois moyens différents :

- Évaluer les indicateurs les plus sensibles lorsque que le composant est intégré (composant largement diffusé et innovant). Ceci permet de savoir quels sont les objectifs de performance qui risquent d'être dégradés lorsque le composant est intégré dans le bâtiment. Et si les indicateurs de performance sont pondérés au regard de la performance souhaitée pour un bâtiment donné (*cf.* PARTIE 3 : CHAPITRE 4 : I.1.a ci-dessous), alors l'information obtenue est propre au bâtiment dans lequel le composant est intégré ;

- Evaluer les aléas les plus préjudiciables pour le composant (composant largement diffusé). Ceci permet ainsi de connaitre quels sont les aléas liés au composant qui risquent de le dégrader et par conséquent de dégrader la performance du bâtiment. En effet, une dégradation à l'échelle du composant a un impact sur l'échelle du bâtiment étant donné que le composant ne remplit plus entièrement son rôle du fait de sa dégradation ;

- Evaluer les aléas les plus préjudiciables pour les indicateurs de performance qui représentent la performance globale (composant largement diffusé). Ceci permet ainsi

de connaitre l'impact direct du composant sur la performance globale du bâtiment. Là encore, l'information obtenue peut être propre à un bâtiment donné si les indicateurs de performance sont pondérés au regard de la performance souhaitée pour ce bâtiment en particulier.

Comme indiqué précédemment, après expérimentation, il apparaît que l'échelle utilisée pour déterminer l'impact des couples aléa/risque sur les indicateurs de performance permettant d'évaluer les aléas les plus préjudiciables pour les indicateurs de performance et les indicateurs de performance les plus sensibles n'est pas la plus appropriée. Il s'agit donc d'un point d'amélioration d'ores et déjà identifié en utilisant des distributions de probabilités.

Les données sont ici combinées via trois types de pondération : équiprobable, au regard de la capacité des experts à estimer des jugements ou au regard de leurs expériences. Néanmoins, les données peuvent également être combinées en tirant aléatoirement les experts ou en utilisant d'autres méthodes, même si les plus préconisées au regard de la littérature (Cooke, Burgman précédemment cité à plusieurs reprises dans ce manuscrit) sont celles utilisant des pondérations au regard de la capacité des experts à estimer l'incertain.

Enfin, concernant le processus secondaire pour les composants innovants, on peut s'interroger sur la pertinence de demander aux experts d'évaluer une estimation de l'impact des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance. En effet, l'identification de ces couples est déjà une information pertinente en soi puisqu'elle permet d'avoir en amont les couples 'aléa/risque' éventuels à prendre en compte lorsque ce composant innovant est intégré. Ceci permet également d'avoir un retour d'expériences rapidement afin de pouvoir passer au processus principal dès lors que suffisamment d'experts ont rencontré ce composant sur des projets de construction et sont en mesure de faire des estimations plus pertinentes puisque basées sur plus d'expériences de leur part. Egalement, la question à se poser avant de passer au processus principal concerne la disponibilité de valeurs de références pour la création du questionnaire de calibration qui peuvent ne pas toujours exister par manque de données sur le composant étudié.[26] En outre, recenser le nombre de fois que les couples 'aléa/risque' apparaissent au regard du nombre d'experts (égale ou inférieur au nombre d'experts constituant le panel) peut apporter déjà un premier élément de réponse. Finalement, reste à vérifier si l'information issue de l'impact de ces couples sur les indicateurs de performance intéresse et/ou peut être source d'information utilisable par les professionnels de la construction ? Il serait intéressant de connaitre la réelle utilité de ce genre d'estimation dont la fiabilité est questionnable avant de continuer à proposer cette étape dans le processus secondaire. Autant l'identification des couples 'aléa/risque' semble essentiel et permet de créer une première base de données pour ensuite passer au processus principal, autant l'estimation de l'impact paraît questionnable en terme de rigueur scientifique et n'apporte pas vraiment une information essentielle à cette étape de développement et au regard du niveau de maturité du composant de construction. Il serait intéressant d'avoir un

[26] L'autre question à se poser concerne la pertinence et la justesse d'utiliser ou non des valeurs de référence liées à la catégorie du composant étudié (produits d'isolation par exemple) et non pas liées directement au composant étudié.

retour des experts ayant contribué lors de la restitution des résultats pour voir si cela est pertinent.

III. Discussions sur l'expérimentation et le déroulement de la méthode

Dans ce paragraphe sont discutés les bonnes pratiques, les difficultés et les apprentissages mis en exergue par l'expérimentation de la méthode en Annexe N se trouve un tableau résumant l'ensemble de ces bonnes pratiques, risques et apprentissages pour chaque étape de la méthode.

Dans cette section également, les étapes seront détaillées les unes après les autres.

III.1. Etape A (processus préliminaire) : Construction de la famille de performance

Dans un premier temps, afin d'avoir une famille de performance représentant au mieux la performance globale souhaitée pour un bâtiment, il est essentiel de bien définir chaque objectif de performance à atteindre. S'appuyer sur des travaux et de famille de performance déjà existants peut permettre d'avoir une bonne base à adapter à ses objectifs de performance à atteindre. Ensuite, il apparait évident de bien synthétiser les indicateurs pour éviter d'une part les redondances, d'autres part trop d'interdépendances entre eux. Finalement, il est primordial que l'énoncé de chaque indicateur de performance puisse être compris de tous les acteurs de la construction puisque ce sont eux qui évalueront l'impact des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance.

III.2. Etape 2 (processus principal) & Etape I (processus secondaire) : Sélection du panel d'experts

Concernant la sélection du panel d'experts, plus de personnes potentielles sont contactées via les différents réseaux existants, plus le recrutement est facile. Garantir la confidentialité peut être un levier supplémentaire pour qu'une personne accepte de contribuer. En outre, un autre levier est de présenter les résultats obtenus pour un composant déjà étudié avec la méthode qui fait figure d'exemple.

En effet, il est difficile de trouver des personnes acceptant de dégager du temps pour contribuer et ayant suffisamment de retour d'expériences sur le composant. D'autant plus que dans le cas des composants innovants, le panel d'experts peut manquer de représentativité aussi bien au regard des phases du cycle de vie du bâtiment que sur les métiers de la construction. Dans le cas des composants innovants, toutes personnes ayant un minimum d'expérience avec le composant est la bienvenue. Ce qui ne peut être le cas pour les composants largement diffusés.

III.3. Etape 3-1 (processus principal) : Pondération des experts

Dans un premier temps, il est primordial de bien préciser chaque question afin de lever les ambiguïtés et que les experts comprennent exactement la question.

Une des difficultés est de disposer de connaissances fiables sur le composant pour la création d'un questionnaire pertinent afin d'évaluer la capacité des experts à estimer l'incertitude.

L'expérimentation sur le composant largement diffusé a démontré la pertinence de ne pas envisager cette étape pour un composant innovant.

III.4. Etape 3-2 (processus principal) et Etape II-a (processus secondaire) : Construction de la base de données composant

Afin de rendre plus aisée la contribution des experts, il est nécessaire de rendre les supports (Matrice composant 'aléa/impact) et Questionnaire de recueil de données) les plus ergonomiques et faciles d'utilisation possible. Si le support s'avère trop compliqué, il nécessite alors une assistance dès que les experts ont besoin d'explications.

Cependant il est important de penser également à la méthode d'extraction des réponses des experts pour leurs utilisations ultérieures.

Un apprentissage évident est de bien préparer et tester chaque questionnaire, matrice ou autres supports de contribution au préalable afin d'éviter le moindre doute lors de la contribution des experts et éviter les biais dans les réponses des experts car la demande a été mal comprise et/ou interprétée Il ne peut y avoir de place pour l'interprétation des questions de la part des experts. De plus, il faut veiller à ne pas solliciter à plusieurs reprises les experts afin de les contraindre au minimum et d'éviter tout découragement pouvant les conduire à abandonner l'étude.

Enfin, cela paraît évident, mais avant de préparer les supports de contribution, une étape essentielle préalable consiste à bien se poser en amont la question de déterminer exactement les données à récolter au regard des interrogations. Pour savoir quelles données récolter, il faut identifier clairement l'information recherchée.

III.5. Etape 3-1b et 3-2b (processus principal) et Etape II-b (processus secondaire) : Contribution des experts

Lors de la contribution des experts, notamment si cela se fait sous forme d'entretien, il est important d'éviter d'influencer les experts soit par la manière dont est posée la question, soit lorsque les réponses sont notées (ne pas interpréter par exemple mais noter mot pour mot et/ou demander des précisions auprès des experts si un doute subsiste). Par voie de conséquence, il faut éviter de répondre aux demandes éventuelles des experts de validation de leurs réponses.

III.6. Etape 4 (processus principal) et Etape III (processus secondaire) : Evaluation de l'impact du composant sur la performance globale du bâtiment

La base de données composant 'aléa/impact' doit être construite au mieux, afin de pouvoir extraire facilement les données suivant les cas.

Ensuite il est important de bien savoir à partir de quand il y a suffisamment de REX pour que les données apportent des éléments de réponses pertinents.

Lors de l'analyse de données, chaque résultat à obtenir doit être bien défini, afin de déterminer l'outil à utiliser pour analyser les données. Parfois des outils simples suffisent au regard de l'information dont il est question. Par ailleurs, il est essentiel de définir des seuils d'acceptabilité ou non des couples 'aléa/risque' pour pouvoir conclure quant aux résultats de l'analyse.

Enfin, il est important de noter que l'ensemble des données est basé sur des dires d'experts et qu'elles sont donc à prendre avec précaution puisque même si une pondération au regard de la performance des experts à exprimer des jugements est utilisée pour combiner les données des experts, les résultats ne sont pas fiables à 100 % et la certitude n'existe pas. D'autant plus s'il y a trop peu d'experts contribuant et avec une majorité ayant des pondérations négligeables voir nulles.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons une discussion de la méthode au regard de ses bases théoriques et de son expérimentation. Celle-ci a permis de se rendre compte que bien que la culture du risque et l'appréhension des incertitudes ne sont pas encore ancrées dans le domaine de la construction, certains acteurs montrent déjà un réel intérêt pour ce genre de pratique et sont prêts à investir du temps.

Dans le chapitre suivant, nous proposons d'expliciter des pistes d'utilisation et de valorisation de cette méthode en fonction des différents acteurs de la construction identifiés.

CHAPITRE 4 : VALORISATION DE LA METHODE

La méthode développée ici a pour vocation de créer des bases de données par composant de construction dont les données peuvent être alimentées mais aussi utilisées par l'ensemble des acteurs de la construction. Après avoir présenté les enseignements issus de la phase d'expérimentation nous nous sommes attachés à identifier les pistes de valorisation d'une telle méthode. Ce chapitre propose donc de présenter les intérêts et usages pressentis de la méthode pour chaque catégorie d'acteurs de la construction. Le Tableau 23 résume ces intérêts et usages.

Ce chapitre est structuré suivant les quatre grands types d'usages pressentis de la méthode :

- Aide à la décision ;
- Formation ;
- Information,
- Aide à l'évaluation.

Tableau 23 : Intérêts et usages de la méthode pour les différentes catégories d'acteurs de la construction

Acteurs	Intérêts pressentis pour la méthode	Usages identifiés de la méthode
Equipe MOA	S'assurer que les composants de construction choisis par la maitrise d'œuvre ne vont pas dégrader la performance globale du bâtiment définie dans le programme	Aide à la décision conception
Equipe MOE	Aider à la décision pour le choix de composants de construction répondant au mieux à la performance globale définie dans le programme	Aide à la décision conception
Gestionnaire du bâtiment	Déterminer les bonnes et mauvaises pratiques notamment lors de la vie/exploitation du bâtiment pour maintenir au mieux la performance globale du bâtiment tout au long de sa vie	Aide à la décision gestion
Fédération	Déterminer les bonnes et les mauvaises pratiques notamment lors de la mise en œuvre pour que la pose des composants de construction dégradent le moins possible la performance globale	Formation Information
Entreprises gros et second œuvre	Déterminer les bonnes et les mauvaises pratiques notamment lors de la mise en œuvre pour que la pose des composants de construction dégradent le moins possible la performance globale	Aide à la décision pour l'amélioration Identification des risques
Industriels	Aider à l'optimisation des composants de construction pour qu'ils répondent au mieux aux exigences de performance globale de l'ouvrage	Aide à la décision pour l'amélioration Identification des risques
Assureurs	Identifier un profil aléas/sinistres. Récolter de l'information	Identification des aléas et impacts associés Information
CSTB	Aider à l'évaluation des composants de constructions au regard de la performance globale de manière systémique, transverse et non compartimentée, indicateurs par indicateurs	Evaluation
Contrôleurs techniques	Avoir une aide afin de s'assurer que les composants de construction ne provoqueront pas des sinistres	Aide à la décision conception & construction
ADEME	Construire une mission de service public auprès du grand public pour accompagner au choix et informer	Information Aide à la décision conception & construction

I. Aide à la décision (conception, construction, gestion, amélioration)

L'aide à la décision peut intervenir à différentes phases du cycle de vie d'un bâtiment et intéresser différents acteurs de la construction :

- Phase conception : Equipe Maitrise d'Ouvrage Associé (MOA), Equipe Maitrise d'Œuvre Exécutive (MOE), Contrôleur technique, ADEME ;
- Phase fabrication – pour améliorer le composant : industriels ;
- Phase mise en œuvre : Contrôleur technique, ADEME, entreprises gros œuvre et second œuvre ;
- Phase exploitation – pour un usage en gestion : Gestionnaire du bâtiment ;

I.1. Phase conception

En phase conception, les différents acteurs concernés peuvent se servir des résultats de la méthode au regard de l'impact qu'un composant de construction peut avoir sur la performance globale du bâtiment. Une fois la base de données composant 'aléa/impact' bien renseignée, la méthode permet de connaitre l'impact du composant au regard d'une performance souhaitée pour un projet de construction ou de rénovation donné en allouant une pondération à chacun des indicateurs de performance en fonction des objectifs de performance souhaités. De ce fait il est aisé de vérifier l'impact que peut avoir le composant pour le bâtiment donné.

Le paragraphe ci-dessous présente l'effet de la pondération des indicateurs de performance sur l'impact d'un composant sur la performance globale du bâtiment.

a. Effet de la pondération des indicateurs de performance sur l'impact d'un composant sur la performance globale du bâtiment.

Afin de se rendre compte de quelle façon les objectifs de performance à atteindre pour un bâtiment précis peuvent influencer la manière dont un composant de construction va impacter la performance globale du bâtiment, les résultats obtenus pour le composant largement diffusé 'ETICS' ont été comparés pour trois jeux de pondération des indicateurs de performance de la famille de performance représentant la performance globale souhaitée dans trois cas hypothétiques différents (*cf.* Figure 15).

- Pondération équiprobable : chaque indicateur de performance à le même poids ;
- Pondération aléatoire 1 : pondération (entre 1 et 10) choisie aléatoirement représentant la performance globale souhaitée pour un bâtiment hypothétique pour lequel le coût global n'est pas une cible de performance à optimiser (pondération à 1 pour les indicateurs de cette cible) ;

– Pondération aléatoire 2 : pondération (entre 1 et 10) choisie aléatoirement représentant la performance globale souhaitée pour un bâtiment hypothétique pour lequel le coût global est une cible de performance à optimiser (pondération arbitraire à 6 pour les indicateurs de cette cible).

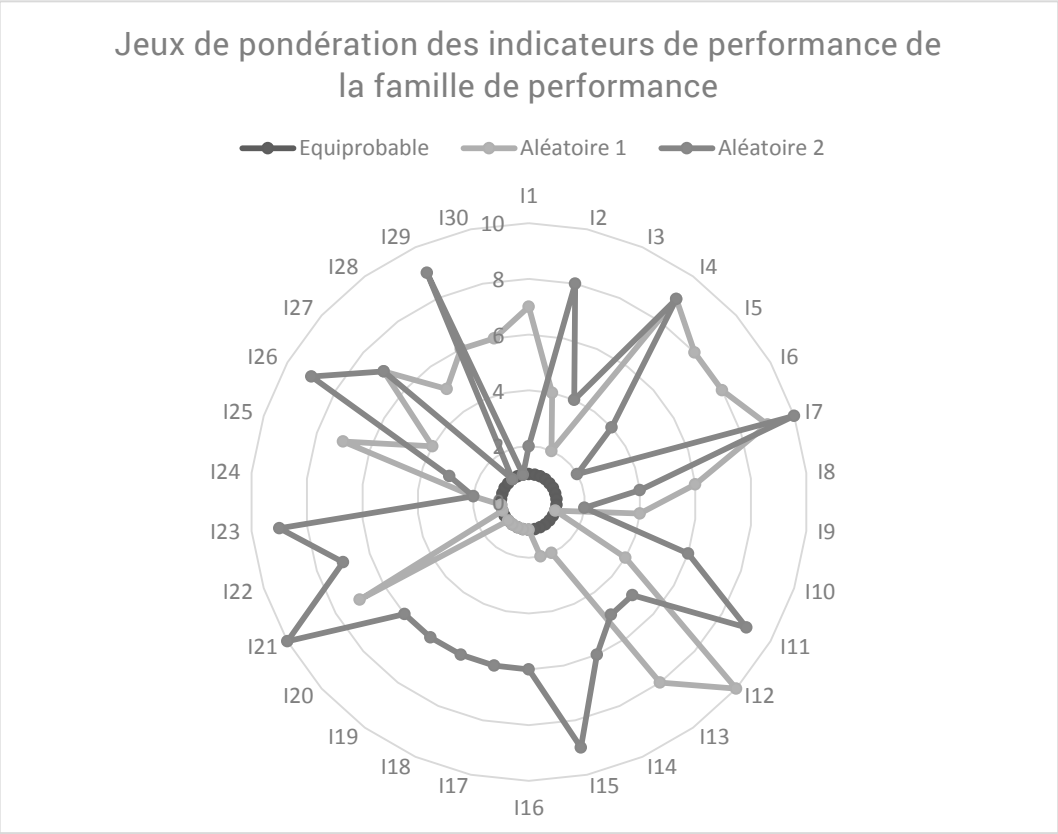


Figure 15 : Trois jeux de pondération des indicateurs de performance représentant trois performances globale à atteindre hypothétiques différentes (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2)

Ainsi, l'impact sur la performance globale à atteindre d'un bâtiment précis (à construire ou à rénover) d'un composant de construction dont la base de données 'aléa/impact' est existante peut être évalué au regard du jeu de poids accordé pour chaque indicateur de performance représentant la performance globale à atteindre.

i. Incidence sur les indicateurs de performance

Le Tableau 24 est un extrait du tableau en Annexe K présentant la sensibilité des indicateurs de performance au regard de l'intégration du composant ETICS pour les trois jeux de pondération de la famille de performance, ainsi que la pondération associée.

Sur le Tableau 24, en fonction du jeu de poids appliqué aux indicateurs de performance, les indicateurs les plus sensibles ne sont pas les mêmes.

Ainsi si un indicateur de performance est impacté par l'intégration du composant alors plus la pondération associée à cet indicateur est élevée et plus il est sensible à l'intégration du composant, donc plus il est à surveiller.

Cela permet de choisir le composant le plus approprié au regard d'une performance globale précise à atteindre. En effet, il n'y a pas systématiquement et dans l'absolu un composant de construction par catégorie (isolation, fenêtre, mur, toiture, …) plus performant que les autres ou « meilleur » que les autres mais certains composants de construction sont plus appropriés pour un bâtiment ayant une certaine performance globale à atteindre, alors qu'ils ne le sont pas pour un autre bâtiment ayant une autre performance globale à atteindre.

ii. Incidence sur les aléas

De même, le Tableau 25 est un extrait du tableau en Annexe L présentant l'incidence des différents jeux de pondération attribués aux indicateurs de performance sur les aléas les plus préjudiciables pour la performance globale du bâtiment. Il peut par exemple être constaté que pour le jeu de poids aléatoire 1, l'aléa 9, défaut de conception est moins préjudiciable que pour les jeux de poids équiprobable et aléatoire 2.

Là encore, il est intéressant de voir l'influence de la performance globale à atteindre pour un bâtiment précis (représentée par les indicateurs de performance pondérés en fonction des objectifs de performance voulus) sur l'identification des aléas les plus préjudiciables associés à un composant pour le bâtiment en question. Cela permet au regard de cette performance globale à atteindre de surveiller, anticiper, voire éviter les aléas les plus préjudiciables pour le porteur du projet de construction ou de rénovation.

Tableau 24 : Comparaison de la sensibilité des indicateurs de performance dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance

Indicateurs	Id	Jeu équiprobable	
Coût en exploitation	I18	1	0,722
Entretien et maintenance	I6	1	0,719
Intégration urbaine	I10	1	0,449
Sécurité pour un risque assurable	I27	1	0,380
Adéquation à l'usage du bâtiment	I8	1	0,342
Sécurité pour un risque non assurable	I28	1	0,285
Sécurité utilisateur	I29	1	0,285
Coût initial (à la livraison)	I16	1	0,274
Coût à la livraison	I17	1	0,222
Gêne engendrée par la MEO du procédé	I13	1	0,150
Performance thermique de l'enveloppe	I22	1	0,150
Consommation d'énergie primaire totale	I23	1	0,150
Simplicité d'emploi (MEO)	I12	1	0,125
Sécurité opérateur	I30	1	0,120

Indicateurs	Id	Jeu aléatoire 1	
Entretien et maintenance	I6	8	5,749
Sécurité pour un risque assurable	I27	7	2,660
Adéquation à l'usage du bâtiment	I8	6	2,053
Sécurité utilisateur	I29	6	1,710
Sécurité pour un risque non assurable	I28	5	1,425
Simplicité d'emploi (MEO)	I12	10	1,247
Gêne engendrée par la MEO du procédé	I13	8	1,197
Coût en exploitation	I18	1	0,722
Sécurité opérateur	I30	6	0,719
Intégration urbaine	I10	1	0,449
Coût initial (à la livraison)	I16	1	0,274
Coût à la livraison	I17	1	0,222
Temps de MEO	I14	2	0,150
Performance thermique de l'enveloppe	I22	1	0,150

Indicateurs	Id	Jeu aléatoire 2	
Coût en exploitation	I18	6	4,332
Intégration urbaine	I10	6	2,692
Sécurité pour un risque assurable	I27	7	2,660
Sécurité utilisateur	I29	9	2,565
Coût initial (à la livraison)	I16	6	1,645
Entretien et maintenance	I6	2	1,437
Adéquation à l'usage du bâtiment	I8	4	1,369
Consommation d'énergie primaire totale	I23	9	1,346
Coût à la livraison	I17	6	1,335
Performance thermique de l'enveloppe	I22	7	1,047
Gêne engendrée par la MEO du procédé	I13	5	0,748
Simplicité d'emploi (MEO)	I12	5	0,623
Temps de MEO	I14	6	0,449
Sécurité pour un risque non assurable	I28	1	0,285

Tableau 25 : Comparaison du classement des aléas les plus préjudiciables dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance

Aléas	Id	Jeu équiprobable
Opérateur non formé / non sachant	A10	0,821
Aléas non prévus	A14	0,821
Défaut de conception (mauvais calepinage, ...)	A9	0,475
Défaut d'exécution - Liaison avec l'isolant au support assurée par adhérence ou fixations mécaniques non parfaitement assurée	A8	0,474
Action des habitants, riverains	A12	0,342
Pas ou mauvaise préparation du support (non planéité, fissure, reste de colle ou de revêtement, …)	A13	0,285
Défaut d'exécution ponctuel - Joints trop ouverts rebouchés à l'enduit	A7	0,222

Aléas	Id	Jeu aléatoire 1
Opérateur non formé / non sachant	A10	3,952
Aléas non prévus	A14	3,388
Défaut d'exécution - Liaison avec l'isolant au support assurée par adhérence ou fixations mécaniques non parfaitement assurée	A8	2,294
Action des habitants, riverains	A12	1,482
Pas ou mauvaise préparation du support (non planéité, fissure, reste de colle ou de revêtement, …)	A13	1,330
Défaut de conception (mauvais calepinage, ...)	A9	1,140
Défaut d'exécution ponctuel - Joints trop ouverts rebouchés à l'enduit	A7	0,770

Aléas	Id	Jeu aléatoire 2
Opérateur non formé / non sachant	A10	4,791
Aléas non prévus	A14	4,585
Défaut de conception (mauvais calepinage, ...)	A9	2,789
Défaut d'exécution - Liaison avec l'isolant au support assurée par adhérence ou fixations mécaniques non parfaitement assurée	A8	2,368
Action des habitants, riverains	A12	2,280
Défaut d'exécution ponctuel - Joints trop ouverts rebouchés à l'enduit	A7	1,283
Défaut de matériaux - Remontée de liant en surface	A4	0,873

b. *Comparaison de composants de construction d'une même catégorie pour un projet de construction/rénovation donné*

Dès lors que plusieurs bases de données 'aléa/impact' existent pour plusieurs composants de construction pour une même catégorie (isolant, toiture, sol, …) alors les composants peuvent être comparés entre eux pour un projet donné (pour lequel un jeu de pondération des indicateurs de performance est proposé) afin de déterminer le(s)quel(s) est le plus approprié.

Effectivement, déterminer le meilleur composant de construction pour une catégorie est rarement possible, d'autant plus si cela doit être une généralité. En revanche pour un projet donné, un ou plusieurs composants de construction peuvent être plus avantageux que d'autres au regard des performances à atteindre.

En outre, cela permet de déterminer quels sont les aléas à anticiper et les indicateurs à surveiller pour diminuer au mieux la dégradation de la performance globale tout au long du cycle de vie du bâtiment.

c. *Des bases de données pour le Building Information Model (BIM)*

Le BIM est la modélisation des informations ou données du bâtiment représentant un ensemble de méthodes de travail ou de processus utilisés lors des différentes phases du cycle de vie du bâtiment permettant notamment de définir ce que feront les acteurs de la construction, comment et quand.

L'un des avantages du BIM est qu'il peut regrouper un ensemble de données, règles expertes, réglementations, normes, etc… permettant d'optimiser l'aide à la décision lors des différentes phases du cycle de vie. Ainsi les bases de données composant 'aléa/impact' issues de la méthode pourront être sources d'informations complémentaires pour le BIM.

Par exemple une collaboration pourrait être envisagée avec Zou et al. [Zou, 2015], qui ont développé un système de management intégrant le management de la connaissance au BIM (BIM and Knowledge based Risk Management System – BKRMS) afin de pouvoir être compatible avec le management du risque tout au long du cycle de vie du projet. Ils souhaitent notamment développer une base de données contenant l'ensemble des risques basée sur l'analyse de la littérature scientifique, la documentation industrielle et les retours d'expériences écrits, ainsi que sur une librairie de réflexion/raisonnement basée sur des cas issus du management du risque industriel afin d'intégrer le risque dans le BIM en développant notamment un outil intégré à un logiciel BIM et en le testant sur différents cas d'étude.

I.2. Phase fabrication

Le retour d'expériences alimentant les bases de données peut permettre aux industriels fabriquant les composants de construction d'une part d'améliorer leurs composants lorsque le composant est innovant en bénéficiant d'un retour d'expériences, certes encore peu conséquent, mais permettant très en amont d'identifier un certain nombre de couples

‘aléa/risque’. D’autre part lorsque le composant est largement diffusé de s’inscrire dans un processus d’amélioration continue, afin de réduire, voire d’éliminer certains aléas sur lesquels les industriels peuvent intervenir.

I.3. Phase de mise en œuvre

L’expérimentation a permis de mettre en évidence que certains aléas apparaissent en phase de mise en œuvre, aussi certains de ces aléas peuvent être correctement appréhendés afin de les réduire, voire de les éviter.

I.4. Phase exploitation

Les gestionnaires du bâtiment peuvent bénéficier de ce retour d’expériences afin d’améliorer la gestion du bâtiment et notamment de faire le choix le plus adéquat afin de garantir ou du moins de dégrader a minima la performance globale lors de cette phase.

II. Formation (processus d’amélioration continue)

Les fédérations peuvent notamment utiliser les bonnes et les mauvaises pratiques mises en exergue par la méthode afin de proposer des formation auprès des acteurs de la construction toujours dans une optique d’amélioration continue via les retours d’expérience. Lors de la mise en œuvre des composants de construction, il est notamment apparu aussi bien pour le composant innovant que largement diffusé que l’aléa ‘Opérateur non formé’ est préjudiciable dans les deux cas. Ainsi, cela permet de se servir des données issues de la méthode pour éviter certains aléas contribuant à la dégradation de la performance globale et voire de les faire disparaitre avec le temps.

III. Information (diagnostique, identification du risque)

Les fédérations, les assureurs et l’ADEME peuvent utiliser les données récoltées, ainsi que les résultats comme sources d’information. En effet les fédérations peuvent diffuser l’information auprès de leurs adhérents permettant de rendre accessible au plus grand nombre notamment en terme de bonnes et mauvaise pratiques. Tandis que les assureurs peuvent utiliser l’information pour identifier notamment des profils ‘aléa/sinistre’ par composant. Enfin l’ADEME, dans une optique d’accompagnement au choix et à l’information du grand public peut se saisir de l’information pour préparer et construire ses campagnes d’information.

IV. Aide à l’évaluation

Finalement les instructeurs d’avis technique, les membres de Groupe Spécialisé (en charge de valider ou non les avis techniques) peuvent utiliser l’information pour aider à l’évaluation des composants de construction. En effet, cela peut servir de support pour les discussions, notamment donner des indications sur le fait de prendre du temps pour débattre sur certains aléas et risques apparus comme préjudiciables (tandis que certains sont dans la conscience collective sans pour autant l’être forcément en réalité) et ainsi alimenter les débats avec un retour d’expériences fiabilisé et objectivé.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons des valorisations possibles pour la méthode. Ainsi nous avons identifié que les résultats issus de la méthode pour un composant de construction peuvent permettre soit d'être sources d'information pour l'aide à la décision, aussi bien en phase de conception, qu'en phase de construction ou de gestion et également dans une optique d'amélioration des composants de construction. Puis nous avons aussi identifié que les résultats issus de la méthode peuvent être un apport d'information pour les formations proposées aux acteurs de la construction, ainsi que pour les assureurs. Enfin cette méthode peut apporter des éléments afin d'être une aide pour l'évaluation des composants de construction.

Dans cette troisième et dernière partie, nous avons dans un premier temps présenté l'expérimentation de la méthode et les résultats associés sur deux composants de construction. Dans le premier chapitre, il s'agissait d'un composant largement diffusé, l'isolation thermique par l'extérieur sous enduit (ETICS) et dans le second chapitre d'un composant innovant, le Panneau Isolant sous Vide (PIV). Cela nous a permis dans un troisième chapitre de mettre en exergue et de discuter de l'apport de la méthode pour le domaine du bâtiment, ainsi que ses avantages, limites, perspectives et améliorations d'un point de vue théorique et également des bonnes pratiques, des difficultés et des apprentissages rencontrés lors de l'expérimentation de la méthode. Enfin dans un dernier chapitre nous avons proposé différentes pistes d'utilisations et de valorisations de la méthode pour les différents acteurs de la construction identifiés.

A présent nous allons conclure quant à ces travaux de recherche et proposer des perspectives.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une méthode d'évaluation de l'impact d'un composant de construction intégré sur la performance globale (énergie, environnement, économie et social) du bâtiment et sur tout son cycle de vie est proposée dans ce travail de thèse.

L'importance et l'intérêt de proposer une méthode prenant en compte la complexité d'un bâtiment d'une part et l'incertitude d'autre part a été mise en évidence très rapidement. Celle-ci doit permettre d'exploiter le retour d'expériences lorsque des données expérimentales ne sont pas disponibles et d'adopter une approche globale, systémique pour évaluer la prise de risque associée à l'intégration d'un composant dans un bâtiment.

L'exploration d'autres domaines où ces questions ont déjà été abordées a permis de choisir les différentes méthodes et outils à utiliser pour développer la méthode proposée ici.

Cette méthode se décompose en trois processus. Le premier permet d'une part d'établir une famille d'indicateurs de performance représentant les objectifs de performance à atteindre pour un bâtiment puis à choisir le processus à suivre par la suite : le processus principal ou secondaire, selon qu'il s'agisse de composants de construction largement diffusés ou de composants de construction innovants. Deux cas d'étude ont permis d'expérimenter l'ensemble des processus : Dans un premier temps un procédé d'isolation largement diffusé : l'isolation thermique par l'extérieur sous enduit, ETICS pour expérimenter le processus principal ; puis le Panneau Isolant sous Vide : un composant innovant permettant d'expérimenter le processus secondaire.

Cette expérimentation ainsi que l'analyse des résultats qui en découle a permis d'une part de tirer des conclusions au regard de chacun des composants étudiés et d'autre part de tirer des enseignements et d'identifier des perspectives pour la méthode, ainsi que son intérêt pour le secteur de la construction et son opérationnalité.

L'atout majeur de cette méthode est qu'elle permet d'avoir une meilleure connaissance sur la prise de risque associée à l'intégration d'un composant de construction et son impact sur le bâtiment d'un point de vue global. En effet, elle permet :

- D'identifier les couples 'aléa/risque' associés au composant étudié (largement diffusé ou innovant) ;
- De mettre en évidence, ce grâce à l'aide d'un jeu de poids pondérant les indicateurs de performance représentant la performance globale souhaitée pour un bâtiment donnée :
    - Les indicateurs les plus sensibles au regard de ce composant (largement diffusé) ;

- L'impact de l'intégration du composant via les couples 'aléa/risque' recensés sur tout le cycle de vie du bâtiment à l'échelle du composant et à l'échelle du bâtiment (composant largement diffusé).

En outre, cette méthode présente plusieurs avantages, puisqu'elle permet :

- La formalisation de la performance globale du bâtiment grâce à la création d'une famille d'indicateurs de performance pour lesquels des poids peuvent être associés afin d'être représentatifs de la performance globale souhaitée pour un bâtiment donné ;

- L'adaptabilité de la méthode et de l'information récoltée au regard du composant étudié, largement diffusé ou innovant ;

- La systématisation de l'identification des aléas et risques associés à un composant qu'il soit largement diffusé ou innovant ;

- La prise en compte de l'incertitude ;

- La constitution d'une base de données pour les composants largement diffusés basée sur un panel d'experts représentatif de l'ensemble des métiers de la construction et ce sur tout le cycle de vie du bâtiment avec des visions soit spécialiste, soit généraliste ;

- La prise en compte de la performance des experts à estimer des jugements pour les composants largement diffusés afin d'obtenir des données les plus représentatives de la réalité et validées.

Grâce à l'expérimentation de cette méthode certains verrous ont pu être identifiés. Afin d'améliorer sa mise en œuvre et son exploitation, des mesures sont proposées pour lever ces verrous :

- Recruter des experts pour contribuer à l'étude d'un composant n'est pas aisé, aussi il est nécessaire de faire en sorte que l'expert y trouve un intérêt (rémunération, accès aux résultats pour l'ensemble des composants étudiés, …) afin d'avoir un panel suffisamment conséquent pour que l'analyse des données soit plus aisée et représentative de la réalité ;

- Estimer la performance des experts à estimer des jugements nécessite d'avoir des données de références fiables ce qui n'est pas toujours le cas ;

- L'ergonomie des différents questionnaires et matrices peut constituer un frein, aussi il est essentiel de proposer une ergonomie la plus facile et conviviale possible afin de simplifier la tâche des experts ;

- L'échelle définie préalablement et utilisée dans l'expérimentation pour estimer les impacts des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance n'est pas appropriée, aussi il semble plus judicieux de demander aux experts d'éliciter les

impacts sous forme de distribution de probabilités permettant ainsi d'obtenir plus d'informations en croisant l'ensemble des données ;

- L'évaluation de l'impact des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance dans le cas des composants innovants ne semble pas être judicieuse puisque d'une part les experts ont généralement peu de retour d'expériences sur le composant étudié du fait qu'il est innovant et d'autre part la capacité des experts à exprimer des jugements ne peut être qualifiée dans ce cas car trop peu de données existent pour construire le questionnaire.

L'expérimentation a également permis de mettre en évidence des points d'amélioration :

- La nécessité de laisser la possibilité aux experts d'indiquer et évaluer des couples non identifiés au préalable pour faire ressortir des couples préjudiciables oubliés ou émergeants dans le cas des composants largement diffusés ;

- La nécessité de solliciter un maximum d'experts afin de réunir un certain nombre d'experts sachant correctement exprimer un jugement afin d'obtenir une pondération significative (non nulle ou négligeable) et garantissant des résultats les plus fiables possibles ;

- La nécessité de choisir au mieux les variables de calibration pour s'assurer que la pondération basée sur la performance de l'expert à exprimer des jugements permet bien d'obtenir les résultats les plus proche de la réalité possible.

En outre, l'expérimentation a permis de se rendre compte que le domaine du bâtiment n'est pas encore très mobilisé par la prise en compte des risques et du retour d'expériences alors que c'est un domaine qui doit composer avec la complexité et l'incertain. Aussi, il apparait essentiel de faire bouger les lignes afin que ce genre de méthode puisse être déployé et être véritablement source d'information fiable et conséquente. Cependant, les lignes sont déjà en mouvement puisque certains organismes et individus manifestent un intérêt certain pour ces problématiques.

Aussi, dans une optique de déployer cette méthode, la base de données existante sur le procédé de construction ETICS peut à court terme être complétée via de nouvelles contributions d'experts en prenant en compte les recommandations susmentionnées. Par ailleurs, lorsque le composant innovant PIV sera plus diffusé, le processus principal pourra être mis en œuvre afin de créer une base de données à partir des couples 'aléa/risque' d'ores et déjà identifiés. Ces bases de données pourront servir à moyen terme d'exemples afin de rallier la communauté de la construction à l'utilisation de ce genre de méthode, afin qu'à plus long terme elle puisse être largement déployée sur l'ensemble des composants de construction.

En effet, il existe un intérêt fort à déployer de telle méthode et ce pour l'ensemble des acteurs de la construction, des équipes MOA, MOE au gestionnaire de bâtiment en passant par les fédérations, les assureurs, les contrôleurs techniques, ainsi que les entreprises de construction et les industriels. Ces bases de données pourraient être reliées à des outils d'aide

à la décision ou même au BIM pour faciliter la diffusion de ces enseignements. En effet, les résultats peuvent permettre d'orienter la formation au regard des couples 'aléa/risque' associés à la mise en œuvre du composant et peuvent être également source d'information aussi bien pour les fédérations, que les assureurs. En outre, au regard des données récoltées sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, l'aide à la décision peut se faire en phase conception, construction, gestion ou dans une optique d'amélioration continue des composants de construction.

Nous pouvons d'ailleurs imaginé dans le futur qu'elle soit déployée à grande échelle. En effet, avec la future Réglementation Environnementale 2020, la maîtrise de l'analyse et l'évaluation de la performance globale sur le cycle de vie des bâtiments est un enjeu fondamental. Dès lors, de plus en plus de méthodes d'analyse de l'impact des aléas et risques sur la performance globale sur tout le cycle de vie du bâtiment vont être amenées à se développer. Aujourd'hui nous savons que l'acte de construire est complexe et que prendre des décisions en phase conception devient de plus en plus compliqué. Les acteurs de la construction ont besoin de méthodes d'aide à la conception afin d'optimiser les choix des composants au regard des enjeux de performance (énergétique, environnementale, économique et sociale). Aussi, notre méthode permettant d'évaluer l'impact de l'intégration d'un composant de construction sur la performance globale du bâtiment sur son cycle de vie apporte un élément de réponse quant à cet enjeu. Et la vocation de cette méthode est d'être déployée sur un grand nombre de composants de construction. Elle présente certes un intérêt de manière absolu de par le recueil d'information systématique sur les composants de construction mais c'est son intérêt permettant une analyse relative entre plusieurs composants de construction d'une même famille qui fait sa force. En effet, plus la méthode sera mise en œuvre sur des composants de construction d'une même famille, d'une même catégorie et plus il sera aisé de comparer entre eux ces composants au regard d'un projet de construction défini et ainsi de déterminer lequel est le moins risqué et le plus approprié sur le cycle de vie du bâtiment au regard des objectifs de performance pour un bâtiment donné.

BIBLIOGRAPHIE

[ADUS, 2011], Agence de Développement et d'Urbanisme de la Sambre (ADUS), Présentation du 23 mars 2011 au Mercredi de l'information du projet de recherche « Changement climatique, habitat, urbanisme et services urbains » - Solutions Adaptées pour la Performance Environnementale en Rénovation des Logements Ouvriers Site de Création Développement des Eco-Entreprises (CD2E) [En ligne], Disponible sur : < http://www.cd2e.com/sites/default/files/Cd2eStatic_contenu/mercrediinfo/SAPERLO_CD2E.pdf > (Consulté en janvier 2017)

[ADUS, 2015], Agence de Développement et d'Urbanisme de la Sambre, ADUS, Rapport d'activités 2014-2015 - Programme partenarial, [En ligne], Disponible sur : < http://www.a2i-net.fr/adus/pdf/rapport-activite-2014-2015.pdf > (Consulté en janvier 2017)

[AFNOR, 2004], AFNOR, Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction, NF P01-010, Indice de classement : P01-010

[AFNOR, 2006], AFNOR, Techniques d'analyses de la fiabilité du système - Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), NF EN 60812, Indice de classement : C 20-302

[AFNOR, 2008], AFNOR, Performance énergétique des bâtiments - Méthodes d'expression de la performance énergétique et de certification énergétique des bâtiments, NF EN 15217, Indice de classement : P 50-780

[AFNOR, 2009], AFNOR, Management du risque – Vocabulaire, FD ISO GUIDE 73, Indice de classement : X50-251

[AFNOR, 2010], AFNOR, Management du risque - Principes et lignes directrices NF, ISO 31000, Indice de classement : X50-254

[AFNOR, 2016], AFNOR, Les mots des normes – Lexique, Site de l'AFNOR normalisation [En ligne], Disponible sur : < http://normalisation.afnor.org/les-mots-des-normes/ > (Consulté en janvier 2017)

[Akintoye, 1997], Akintoye A.S., MacLeod M.J., Risk analysis and management in construction, International Journal of Project Management, Vol. 15, No. 1, pp. 31-38

[Al-Bahar, 1990], Al-bahar J.F., Crandall K.C., Systematic Risk Management Approach for Construction Projects, Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 116, No. 03

[AQC, 2017a], Agence Qualité Construction, AQC, Structure et missions, Site de l'Agence Qualité Construction (AQC) [En ligne], Disponible sur : < http://www.qualiteconstruction.com/structure-et-missions.html > (Consulté en janvier 2017)

[AQC, 2017b], Agence Qualité Construction, AQC, Le Dispositif Alerte, Site de l'Agence Qualité Construction (AQC) [En ligne], Disponible sur : < http://www.qualitecocnstruction.com/dispositif-alerte.html > (Consulté en janvier 2017)

[AQC, 2017c], Agence Qualité Construction, AQC, Pathologie et statistiques (Sycodés), Site de l'Agence Qualité Construction (AQC) [En ligne], Disponible sur : < http://www.qualiteconstruction.com/observation/sycodes.html > (Consulté en janvier 2017)

[AQC, 2017d], Agence Qualité Construction, AQC, Retours d'expériences dans les Bâtiments performants, Site de l'Agence Qualité Construction (AQC) [En ligne], Disponible sur : < http://www.qualiteconstruction.com/observation/rex-batimentsperformants-risques.html > (Consulté en janvier 2017)

[AQC, 2017e], Agence Qualité Construction, AQC, Rôle et missions de la Commission Prévention Produits (C2P), Site de l'Agence Qualité Construction (AQC) [En ligne], Disponible sur : < http://www.qualiteconstruction.com/c2p/role-et-missions.html > (Consulté en janvier 2017)

[Arantes, 2013], Arantes L., Projet de recherche : Développement d'un outil d'aide au choix pour la conception globale des bâtiments durables : du choix des données à l'appréciation « experte » des projets d'architecture, Post-Doc, 2012-2013, Support non communicable

[Aspinall, 2008], Aspinall W., Expert Judgment Elicitation using the Classical Model and EXCALIBUR, Briefing notes for Seventh Session of the Statistics and Risk Assessment Section's International Expert Advisory Group on Risk Modeling: Iterative Risk Assessment Processes for Policy Development Under Conditions of Uncertainty / Emerging Infectious Diseases: Round IV

[Baccini, 2010], Baccini A., Statistique Descriptive Elémentaire, Publications de l'Institut de Mathématiques de Toulouse, UMR CNRS 5219, Université Paul Sabatier, Toulouse

[Bazzana, 2011], Bazzana M., Développement et mise en application d'un cadre de modélisation pour l'analyse des risques appliqués aux systèmes constructifs, Thèse de doctorat en génie civil et sciences de l'habitat, Université de Grenoble, France

[Beaudouin, 2009], Beaudouin F., Munier B., A revision of Industrial Risk Management - Decisions and experimental tools in risk business, Risk and Decision Analysis, Vol.1, No. 1, pp. 3-20

[Bedford, 2003], Bedford T., Cooke R.M., Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods, Cambridge University Press, Cambridge

[Burgman, 2006], Burgman M., Fidler F., McBride M., Walshe T., Wintle B., Eliciting Expert Judgments. Report #1: Literature Review Australian, Centre for Excellence in Risk Analysis, University of Melbourne, ACERA Project 0611

[Burgman, 2016], Burgman M. A., Trusting Judgements: How to Get the Best out of Experts, Cambridge University Press, Cambridge

[CCFAT, s.d.], Commision Chargée de Formuler les Avis Techniques (CCFAT), Procédure, Site de la Commission Chargée de Formuler les Avis Techniques (CCFAT) [En ligne], Disponible sur : < http://www.ccfat.fr/fonctionnement-atec/procedure/ > (Consulté en janvier 2017)

[Claude, 2016], Claude F., Nouet S., Critique des matrices de risques pour le secteur de la construction, Techniques de l'Ingénieur, Energie, Métier : Ingénieur territorial, C8109 V1

[Colson, 2017], Colson A.R., Cooke R.M., Cross validation for the classical model of structured expert judgment, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 163

[Cooke, 1991], Cooke R.M., Experts in Uncertainty, Oxford University Press, Oxford

[Cooke, 1992], Cooke R., Solomatine D., EXCALIBR User's Manual - version 3.0, Delft, Delft University of Technology / SoLogic Delft,

[Cooke, 2014], Cooke R.M., Messaging Uncertainty in Climate Change - Supplementary Online Material, Resources for the Future, Washington DC; Delft University of Technology, Department of Mathematics; and Strathclyde University Dept. Management Science

[Cooke, 2015], Cooke R.M., Messaging climate change uncertainty, Nature climate change, Vol. 05

[Cooke, s.d.], Cooke R.M. Elsaadany S., Huang X., Abrégé sur le rendement des schémas des experts sur la pondération de vraisemblance et du rendement du système social, [s.n.]

[Cox, 2008], Cox L.A.T., What's Wrong with Risk Matrices?, Risk Analysis, Vol; 28, No. 2

[CSTB, 2009a], Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, CSTB, Comparaisons point par point, Site du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) [En ligne], Disponible sur : < http://www.cstb.fr/archives/fileadmin/documents/webzines/2009-02/segmentation/Comparaison-point-par-point.pdf > (Consulté en janvier 2017)

[CSTB, 2009b], Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, CSTB, Avis Technique, Appréciation Technique d'Expérimentation, Pass' Innovation : les clés pour comprendre, Site du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) [En ligne], Disponible sur : < http://www.cstb.fr/archives/webzines/editions/edition-de-fevrier-2009/avis-technique-appreciation-technique-dexperimentation-pass-innovation-les-cles-pour-comprendre.html > (Consulté en janvier 2017)

[Dayan, 2014], Dayan H., El Niño : tensions entre forces « naturelles » et forces « anthropiques », Communications, 2014/2, n°95, p. 131-156

[De Finetti, 2008], De Finetti B., Philosophical Lectures on Probability, collected, edited, and annotated by Alberto Mura, Series: Synthese Library, Vol. 340, Finetti, Bruno de, Mura, Alberto (Ed.)

[De Scheemaekere, 2009], X., Fondements philosophiques du concept de probabilité, EME éditions - Collection : Logiques et systèmes, 2009

[EAE, s.d., a], European Association for External Thermal Insulation Composite Systems (EAE), About ETICS, ETICS are quality systems, Site de l'European Association for External Thermal Insulation Composite Systems (EAE) [En ligne], Disponible sur : < http://s278536490.online.de/views/etics/about-etics.html > (Consulté le 02.03.2017)

[EAE, s.d., b], European Association for External Thermal Insulation Composite Systems (EAE), Information Brochure: ETICS are amazing, Save climate - Reduce energy consumption - Create jobs, Site de l'European Association for External Thermal Insulation Composite Systems (EAE) [En ligne], Disponible sur : < http://s278536490.online.de/media;files/pdf/8/18.pdf > (Consulté le 02.03.2017)

[EDF, 2016], EDF, Le Panneau Isolant sous Vide (PIV), Site de EDF [En ligne], Disponible sur : < https://travaux.edf.fr/isolation-et-ventilation/les-techniques-et-materiaux-de-l-isolation/le-panneau-isolant-sous-vide-piv > (Consulté en janvier 2017)

[Finalcad, 2015], L'Observatoire de la construction Finalcad, Etude sur la Construction en Habitat Social, Edition 2015

[GERMA, 2012], Groupe d'étude du projet de recherche ANR GERMA (contrat du 17/02/2009), Management des projets complexes de génie civil et urbain – Guide pratique pour la Maîtrise et la Gestion des Risques, Guide du projet de recherche ANR GERMA

[Gobin, 2003], Gobin C., Analyse fonctionnelle et construction, Techniques de l'ingénieur, Construction, Réglementation. Ingénierie. Géotechnique., L'ingénierie de la construction, C3052

[Gobin, 2015], Gobin C., Enrichissement de l'analyse fonctionnelle - Apport de la construction, Techniques de l'ingénieur, Construction, Droit et organisation générale de la construction, C3060

[Goossens, 2007], Goossens L.H.J., Cooke R.J., Hale A.R., Rodic´-Wiersma Lj., Fifteen years of expert judgement at TUDelft, Safety Science

[GOUV, 2016], Ministère du Logement et de l'Habitat Durable, Expérimenter la construction du bâtiment performant de demain, Site du Ministère du Logement et de l'Habitat Durable [En ligne], Disponible sur : < http://www.logement.gouv.fr/experimenter-la-construction-du-batiment-performant-de-demain > (Consulté en janvier 2017)

[Hadji Rezai, 2014], Hadji Rezai S, Allard F, Abelé C, Doya M., Improving component integration in building construction process, Article de conférence : 40th IAHS World Congress on Housing: Sustainable Housing Construction, 16-19 décembre 2014, Funchal, Madère, Portugal

[Hadji Rezai, 2015], Hadji Rezai S, Allard F, Abelé C, Doya M., Evaluating External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) regarding the building's global performance, Energy Procedia, Volume 78, Pages 1562-1567

[Hans, 2007], Hans J., Morlot R., Collignan B., Boulanger X., et Proisy B., Durabilité des équipements énergétiques et composants d'enveloppe du bâtiment, Rapport de recherche ANR-ADEME

[Herlin, 2011], Herlin A., Breysse D., Ledoux Y., Cohen A., Trois approches complémentaires pour l'analyse des risques de projet, Article de rencontres : XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil, 29 au 31 mai 2011, Tlemcen

[HQE, s.d.], Alliance HQE - GBC France, Certifications, Site de l'Alliance HQE - GBC France [En ligne], Disponible sur : < http://www.hqegbc.org/batiments/certifications/ > (Consulté en octobre 2014)

[Ioannou, 2015], Ioannou I., Rush D., Bisby L., Aspinall W., Rossetto T., Application of Expert Judgment to the Quantification of a Damage Scale for Reinforced Concrete Buildings Exposed to Fire, Article de Conférence : 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP12, 12 au 15 juillet 2015, Vancouver, Canada

[Jato-Espino, 2014], Jato-Espino D., Castillo-Lopez E., Rodriguez-Hernandez J., Canteras-Jordana J.C., A review of application of multi-criteria decision making methods in construction, Automation in Construction, Tome 45, p. 151-162

[Khartabil, 2013], Khartabil F.K., Breysse D., Taillandier F., On the risk management of construction project: a knowledge-based approach, Article de congrès : 21e Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013, Bordeaux

[Lair, 2000], Lair J., Évaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment, Thèse de doctorat en Génie civil, Université Blaise Pascal de Clermont II, France, 2000

[Le Ray, 2012], Le Ray J., Premiers pas dans le management du risque, Techniques de l'ingénieur, Génie industriel, Métier : responsable qualité, Systèmes de management environnemental, janvier 2012, G9000

[Mansour, 2007], Mansour A., Probabilités et statistiques pour les ingénieurs, Publications Hermes Science, Edition Lavoisier

[Mills, 2001], Mills A., A systematic approach to risk management for construction, Structural survey, Vol. 19, N. 5, pp. 245-252

[Morin, 1988], Morin E., Le défi de la complexité, Chimères, No 5/6

[Morin, 1999], Morin E., Les sept savoir nécessaires à l'éducation du futur, Seuil - Publication de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture - UNESCO

[Morin, 2005], Morin E., Introduction à la pensée complexe, Seuil - Points Essais

[Munier, 2004], Munier B., Le management des risques comme ingénierie du subjectif, Exposé d'une conférence du 11.06.2014 du réseau Analyse des Risques Industriels, 2004

[Munier, 2011], Munier B., Dehouck L., How integrated should risk management and quality management be?, Article de conférence : 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP11, 1 au 4 août 2011, Zurich, Suisse

[PACTE, 2015], Programme d'Action pour la Qualité de la Construction et la Transition Energétique, PACTE, Le Programme, Site du Programme PACTE [En ligne], Disponible sur : < http://www.programmepacte.fr/programme > (Consulté en janvier 2017)

[PACTE, 2016a], Programme d'Action pour la Qualité de la Construction et la Transition Energétique, PACTE, Actualités - 13/10/16 - Observatoire de la performance énergétique des logements sociaux, Site du Programme PACTE [En ligne], Disponible sur : < http://www.programmepacte.fr/actualites/131016-observatoire-de-la-performance-energetique-des-logements-sociaux > (Consulté en janvier 2017)

[PACTE, 2016b], Programme d'Action pour la Qualité de la Construction et la Transition Energétique, PACTE, Actualités - 22/11/16 - Création d'un centre de ressources pour la réhabilitation responsable du bâti ancien, Site du Programme PACTE [En ligne], Disponible sur : < http://www.programmepacte.fr/actualites/221116-creation-dun-centre-de-ressources-pour-la-rehabilitation-responsable-du-bati > (Consulté en janvier 2017)

[Pigeon, 2008], Pigeon M., Utilisation d'avis d'experts en actuariat, Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en mathématiques pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Se.)

[RAGE, 2014], RAGE, Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 - Recommandations Professionnelles - Procédés d'isolation thermique extérieure par enduit sur polystyrène expansé, Programme d'accompagnement des professionnels « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

[Ramos, 2013], Ramos N.M.M., Barreira E., Simões M.L., Delgado J.M.P.Q.,
Probabilistic Risk Assessment Applied to Biological Growth on External Surfaces with ETICS, Article de conférence : 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, 26 au 28 août 2013, Chambéry, France

[Rodney, 2014], Rodney E., Khartabil F.K., Taillandier F., Hamzaoui F., Breysse D., Ducq Y., Ledoux Y., Apport de l'ingénierie des connaissances au management des risques de projets de construction, Article de rencontres : 32e Rencontres de l'AUGC, 4 au 6 juin 2014, Orléans, France

[Roy, 1963], Roy B., Une introduction au calcul de probabilités, Mathématiques et sciences humaines, Tome 2, pp. 3-13

[RPC, 2011], Parlement européen, Conseil de l'Union Européenne, Règlement (UE) N°305/2011 du Parlement Européen et du conseil du 9 mars 2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil

[Saporta, 2006], Saporta G., Probabilités, Analyse des Données et Statistique, Technip, Paris, 2006

[Schrödinger, 1992], Schrödinger E., Physique quantique et représentation du monde, Seuil - Points Essais

[Shahriari, 2015], Shahriari M., Sauce G., Buhe C., Boileau H., Construction project failure due to uncertainties - A case study, Occupational Safety and Hygiene III, pp. 165 -169

[Sourani, 2015], Sourani A., Sohail M., The Delphi Method: Review and Use in Construction Management Research, International Journal of Construction Education and Research, Vol. 11, pp. 54-76

[Taillandier, 2015a], Taillandier F., Hamzaoui F., Taillandier P., Breysse D., Un nouveau modèle à base d'agents pour gérer les risques d'un projet de construction - Application au carrefour de Bab El Karmadine à Tlemcen, Article de conférence : 33e Rencontres den l'AUGC, ISABTP/UPPA, 27 au 29 mai 2015, Anglet, France

[Taillandier, 2015b], Taillandier F., Taillandier P., Tepeli E., Breysse D., Mehdizadeh R., Khartabil F., A multi-agent model to manage risks in construction project (SMACC), Automation in Construction, Tome 58, 2015, 1-18

[Talon, 2006], Talon A, Évaluation des scénarii de dégradation des produits de construction, Thèse de doctorat en Génie civil, Université Blaise Pascal de Clermont II, France

[TBC, 2016], Equipe TBC : Consales A.S., Trébulle J., Etude de marché : L'isolation thermique des murs par l'extérieur en France, Les études TBC « Chiffres clés du marché », mars 2016

[Tea, 2009], TEA C., Retour d'expérience et données subjectives : Quel système d'information pour la gestion des risques ? - Le cas de la sécurité dans le transport ferroviaire, Thèse de doctorat en Sciences de gestion, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France

[Thorel, 2014], Thorel M., Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale, Thèse de doctorat en Génie Civil et Sciences de l'habitat, Université de Grenoble, France

[TIPEE, s.d.], TIPEE - Plateforme technologique bâtiment durable, Le projet GRIMOIRE, Site de TIPEE - Plateforme technologique bâtiment durable [En ligne], Disponible sur : < http://www.plateforme-tipee.com/projet/le-projet-grimoire/ > (Consulté en janvier 2017)

[Tversky, 1974], Tversky A., Kahneman D., Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases, Science, New Series

[UPPF/SFJF, 2010], Union Professionnelle Peinture Finitions (UPPF), Syndicat Français des Joints et Façades (SFJF), Règles Professionnelles pour l'entretien et la rénovation de systèmes d'isolation thermique extérieure « ETICS », DTSB Editions, janvier 2010

[Villion, 2004], Villion J., Théorie du regret, incertitude et pessimisme, Thèse de doctorat en Sciences économiques, Université de Caen, France, 2004

[Vrouwenvelder, 2001], Vrouwenvelder A., Holicky B.M., Tanner C.P., Lovegrove D.R., Canisius E.G., Risk Assessment and Risk Communication in Civil Engineering, CIB Report: Publication 259

[Zou, 2015], Zou Y., Jones S.W., Kiviniemi A., BIM and Knowledge Based Risk Management System: A Conceptual Model, Article de rassemblement : CITA BIM Gathering 2015, 12 au 13 novembre 2015

ANNEXES

Annexe A : Quelques concepts sur l'incertitude et les probabilités 179
Annexe B : Analyser les données grâce à la statistique descriptive 185
Annexe C : Système de questionnement pour éliciter les distributions de probabilités de l'impact d'un couple 'aléa/risque' sur le composant lui-même 191
Annexe D : Questionnaire de calibration élaboré pour le procédé ETICS 193
Annexe E : Médiane sur les résultats des 7 experts pour chaque indicateur de performance en prenant la somme des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance pour les trois types de pondérations pour combiner les données des experts - ETICS 195
Annexe F : Classement de la sensibilité des indicateurs au regard du type de pondération pour combiner les données des experts – ETICS 197
Annexe G : Médiane sur les résultats des 7 experts pour chaque aléa en prenant la somme des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance pour les trois types de pondération pour combiner les données des experts– ETICS 199
Annexe H : Combinaison des distributions de l'impact des couples 'aléa/risque' sur le composant des 7 experts pour les trois types de pondérations – ETICS 201
Annexe I : Médiane sur les résultats des 9 experts pour chaque indicateur de performance en prenant la somme des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance avec la combinaison des données pour une pondération équiprobable - PIV 203
Annexe J : Classement de la sensibilité des indicateurs avec une combinaison des données pour une pondération équiprobable – PIV 205
Annexe K : Comparaison de la sensibilité des indicateurs de performance dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance 207
Annexe L : Comparaison du classement des aléas les plus préjudiciables dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance 211
Annexe M : Qualités, limites et perspectives de la méthode 213

Annexe N : Bonnes pratiques, problèmes et apprentissages suite à l'expérimentation de la méthode 217

ANNEXE A : QUELQUES CONCEPTS SUR L'INCERTITUDE ET LES PROBABILITES

"In almost all circumstances, and at all times, we find ourselves in a state of uncertainty…

Uncertainty in every sense…

Uncertainty about actual situations, past and present…

Uncertainty in foresight…

Uncertainty in the face of decision: more than ever in this case…"

Bruno de Finetti [De Finetti, 2008]

[Tea, 2009], [Villion, 2014]

« Les sciences sont constamment confrontées aux incertitudes » [Dayan, 2014]. Et de fait, l'incertitude peut se manifester sous différentes formes et être définie de différentes manières.

Campos (2007) précise que Helton en 1997 a défini la dualité de l'incertitude en proposant deux types majeurs d'incertitude :

- Incertitude subjective (subjective uncertainty) comme « the uncertainty that comes from scientific ignorance, uncertainty in measurement, impossibility of confirmation or observation, censorship, or other knowledge deficienty »;
- Incertitude objective (objective uncertainty) qui correspond à la « "variability" that emerges from the stochastic characteristic of an environment, non-homogeneity of the materials, time drifts, space variations, or other kinds of differences among components or individuals ».

Knight (1921) définit, quant à lui, l'incertitude en faisant la distinction entre le risque, une « incertitude mesurable par une probabilité objective » et l'incertitude, une « incertitude non mesurable par une probabilité objective » :

- Le risque est vu comme une incertitude mesurable, autrement dit il existe une mesure de probabilité considérée comme objective [Villion, 2004][27] et de fait le risque, car mesurable, n'est pas réellement une incertitude ;
- A contrario, l'incertitude, concerne selon Knight (1921) la « connaissance partielle (partial knowldege) » qui est dénuée d'une mesure de probabilité objective, et est une réelle incertitude, puisque que non mesurable.

[27] "Le caractère objectif des probabilités repose soit sur des observations en grand nombre du phénomène caractérisant l'événement soit sur un principe de symétrie qui conduit à définir une probabilité comme le rapport entre le nombre de cas favorables et le nombre de cas possibles. »

Avant de continuer de tenter de définir l'incertitude, il est nécessaire de définir les différentes théories de la probabilité. Tâche non aisée, puisque outre l'aspect mathématique reconnu de la probabilité, un autre aspect moins évident, et pourtant tout autant important de la probabilité, est à prendre en compte, son aspect philosophique. D'autant plus que la communauté scientifique ne converge pas vers les mêmes définitions et n'a pas la même compréhension des concepts formulés pas les auteurs de référence (tel que Knight notamment).

De Scheemaekere (2009) rappelle que le point de vue mathématique est évident et partagé de par les axiomes et les théorèmes permettant de « cadrer » la théorie des probabilités. En revanche, d'un point de vue philosophique, il existe quatre théories majeures qui, de plus, divergent quant au fondement du concept de probabilité. Ce sont la théorie logique, la théorie subjective, la théorie fréquentielle et la théorie de propension. Datant toutes du vingtième siècle, en parallèle à la théorie mathématique des probabilités.

De plus De Scheemaekere rappelle la dualité du concept de probabilité opposant en quelque sorte la théorie à la réalité :

- La probabilité a priori : initiale, avant la collecte de données, c'est la probabilité que les hypothèses se réalisent, autrement dit au sens de la définition de la probabilité symétrique quand tous les événements sont équiprobables et que la probabilité peut se calculer en divisant le nombre de cas favorable à l'événement par le nombre total de cas possibles, c'est une probabilité obtenu en théorie ;

- La probabilité a postériori : expérimentale, suite à la collecte de données, c'est pour un événement observable, sa fréquence de répétition, autrement dit elle correspond à la fréquence relative et est obtenu par observation contrairement à la probabilité a priori.

Au regard de cette dualité du concept de probabilité, les quatre principales théories de la probabilité sont les suivantes [De Scheemaekere, 2009] :

1. La théorie logique : chaque être humain, rationnel et ayant les mêmes données, va attribuer le même degré de croyance dans une hypothèse ou une prédiction ;

2. La théorie subjective : chaque être humain, rationnel et ayant les mêmes données, va de manière subjective attribuer son propre degré de croyance dans une hypothèse ou une prédiction ;

3. La théorie fréquentielle : la probabilité d'un événement n'est autre que la limite de la fréquence relative de l'événement ;

4. La théorie de la propension : la probabilité d'un événement est propre aux conditions particulières provoquant un événement inhérent à ces conditions-là.

Or Knight (1921) précise « We can also employ the terms 'objective' and 'subjective' probability to designate the risk and uncertainty respectively » (III.VIII.1). Ainsi il considère qu'en situation de risque, une mesure de probabilité objective est possible. Par objective, Villion (2004) précise que "le caractère objectif des probabilités repose soit sur des observations en

grand nombre du phénomène caractérisant l'événement soit sur un principe de symétrie qui conduit à définir une probabilité comme le rapport entre le nombre de cas favorables et le nombre de cas possibles », ce qui rapproche de la théorie fréquentielle, puisqu'il s'agit de voir la probabilité comme une limite de la fréquence.

Si en situation de risque, une mesure de probabilité objective est possible. A l'opposé, la théorie subjective part du principe d'une vision propre à chaque être humain, rationnel et ayant les mêmes données, et par conséquent il existe une probabilité propre à chaque être humain. Cela permet dès lors de proposer des probabilités dans des situations où l'approche fréquentielle n'est pas possible, autrement dit en situation d'incertitude, où la probabilité n'est pas mesurable. Savage (1954) propose, ainsi, avec sa théorie des probabilités subjectives, qui « réduit, d'une certaine manière, l'incertitude au risque » [Villion, 2004] l'utilisation des probabilités subjectives certaines, autrement dit lorsque l'incertitude est mesurée par des probabilités subjectives (prenant en compte les choix et traitées comme des probabilités objectives) et lorsque l'ambiguïté n'intervient pas. C'est-à-dire lorsque qu'il n'y a pas matière à avoir plusieurs interprétations pour un même élément.

Cooke (2015) pense qu'en matière d'incertitude il est essentiel d'apprendre des leçons issus des domaines où ils appréhendent déjà l'incertitude : « The oft re-learned lesson is this: probability is the logic of partial belief; reasoning under uncertainty must obey the laws of probability. However the probabilities involved are often subjective. Quantitative uncertainty analysis for broad policy questions has always made massive use of expert subjective probabilities ». Cependant il ajoute « The challenge is to render the use of expert subjective probabilities scientific. » afin de traiter l'incertitude subjective des experts (expert subjective uncertainty) comme des données scientifiques.

Ainsi lorsque des jugements, des estimations d'experts sont utilisés pour établir des probabilités subjectives, une incertitude liée à cette estimation existe.

De plus, Burgman [Burgman, 2016] précise que « all estimates and predictions are uncertain ». En effet, les jugements émis par les experts sont affectés de différents types d'incertitudes et souvent les experts n'en sont pas conscients.

Ainsi selon Burgman (2016), « Uncertainty is the pervasive unpredictability that obscures and shapes our view of the world. ». Burgman exprime bien ici, le fait que l'incertitude est imprévisible et a un impact sur notre manière de voir, d'interpréter le monde. En outre, il ajoute que l'incertitude peut s'exprimer sous différentes formes, être de différents types. De plus, toutes les incertitudes ne sont pas quantifiables. Dans le cas des incertitudes quantifiables, trois types d'incertitudes existent selon Burgman (2016) :

- 'Natural (aleatory) variation' : variation naturelle. C'est une variation qui survient de manière naturelle, un changement imprévisible dans le temps, l'espace ou entre individus d'une même catégorie, population. C'est une divergence due à l'hétérogénéité.

- 'Knowledge-based (epistemic) uncertainty' : incertitude liée à la connaissance. Cette incertitude existe puisque notre connaissance est limitée, i.e. les appareils de mesures

ne sont pas exacts, les données ne sont pas suffisantes. Cela amène à faire des suppositions et estimer de manière subjective dans des situations inconnues. L'erreur de mesure résulterait d'une part de variations (apparemment) aléatoires pour une même mesure répétée due à la précision de l'équipement et aux compétences de l'observateur. D'autre part, elle inclut l'erreur systématique (apparemment) non aléatoire. Cette erreur systématique serait due à la décision d'inclure ou d'exclure des données qui ne devraient pas être inclues ou exclues respectivement. Cela peut également être dû à des erreurs constantes/cohérentes (consistent en anglais), non intentionnelles dans la calibration d'équipement ou l'enregistrement de mesure. Cette incertitude peut être réduite grâce à un recueil de données meilleur et plus conséquent.

- 'Language-based (linguistic) uncertainty' : incertitude liée au langage. Le langage est imprécis, les mots peuvent avoir plusieurs significations, parfois vagues, ambigües ou en fonction d'un contexte particulier alors que ce dernier n'est pas toujours connu. Cela amène à une utilisation différente ou inexacte des mots. Aussi l'incertitude liée au langage se produit souvent et de manières variées. Cette incertitude peut mener à des interprétations différentes des résultats. D'une part les termes utilisés peuvent être flous, vagues. Afin d'éviter qu'un terme soit interprété de manière intuitive et donc non commun à l'ensemble des experts (ils sont généralement définis par leurs qualifications et expériences, mais aussi par leur statut parmi leurs pairs [Burgman, 2016] et *cf.* PARTIE 1 : CHAPITRE 3 : I pour plus de précision), le terme peut être remplacé par une limite technique nette[28]. D'autre part, la 'dépendance au contexte' survient lorsque que le contexte n'est pas bien explicité. Le seul moyen d'éviter ce genre d'incertitude est de préciser exactement le contexte dans lequel se trouve l'étude. En outre, un terme peut être flou et dépendant du contexte. Cependant une fois que le contexte a été précisé, le flou persiste puisque les limites n'ont pas été fixées. D'où l'intérêt de fixer des seuils, des limites entre les différentes catégories, pas de manière arbitraire mais liés à un coût par exemple. Une troisième forme d'incertitude liée au langage est l'ambiguïté. Les mots peuvent avoir plusieurs significations et si la signification n'a pas été précisée, il y a ambiguïté. Dès lors, le risque qu'un expert utilise une signification, tandis qu'un autre utilisera une signification différente est problématique. Enfin, la dernière forme d'incertitude liée au langage se nomme en anglais 'underspecificity', qui peut se traduire par 'insuffisance de précision'. Ainsi une expression qui manque de précision peut être interprétée de différentes manières et porter à confusion. Aussi, préciser l'information liée à une expression est primordial pour éviter ce genre d'incertitude.

Aussi ce n'est pas possible de composer sans prendre en compte l'incertitude. D'une part puisque dès lors qu'un système est complexe, l'incertitude est présente et ne peut être

[28] Par exemple, au lieu de donner aux experts une expression flou comme 'Diverses fissurations localisées', il s'agit de préciser le type de fissuration de cette manière par exemple : 'Diverses fissurations localisées, sous réserve qu'elles affectent moins de 1 % des surfaces considérées (sur la base de 1 m² affecté calculé de la façon suivante : 5 mètres de fissures sur 0,20 m de large)'

négligée. D'autre part puisque l'estimation de probabilité subjective est emprunte d'incertitude.

ANNEXE B : ANALYSER LES DONNEES GRACE A LA STATISTIQUE DESCRIPTIVE

[Baccini, 2010] [Saporta, 2006]

La statistique est la « branche des mathématiques ayant pour objet l'analyse (généralement non exhaustive) et l'interprétation de données quantifiables » (Définition de 'statistique' tiré de TFLi, Trésor de la langue française informatisé). Les premières utilisations recensées datent de l'antiquité (en haute Égypte pour l'enregistrement des crues du Nil). Jusqu'à la fin du 19e siècle, la statistique reste purement descriptive. C'est à partir de cette époque et jusqu'aux années 1960 que les mathématiques inférentielles apparaissent, se développant au même titre que les sciences telles que les mathématiques, la physique et la théorie des probabilités. La statistique, notamment la statistique descriptive multidimensionnelle s'est développée depuis les années 1960 grâce à la banalisation des outils informatiques et graphiques.

Ainsi la statistique est constituée de deux types de statistique, qui se complètent généralement et s'effectuent dans l'ordre ci-dessous dans le cas de traitement de données :

1. Statistique descriptive (statistique exploratoire ou analyse de données) : méthodes permettant la description de données par une présentation synthétique, une représentation graphique et par le calcul de caractéristiques numériques. Aucune hypothèse probabiliste n'est faite ;

2. Statistique inférentielle (statistique mathématique ou statistique inductive) : méthodes permettant de préciser un phénomène sur une population globale grâce à l'observation sur un échantillon de la population. Dans ce cas il est nécessaire d'utiliser des hypothèses probabilistes.

Dans notre cas, seulement la statistique descriptive est utilisée, par conséquent elle seule est présentée dans ce chapitre. Aussi dans un premier temps le vocabulaire de la statistique est présenté, puis les objectifs de la statistique descriptive pour terminer avec les mesures permettant de synthétiser les données.

Définitions

Le vocabulaire de la statistique est spécifique au domaine de la démographie, l'un des premiers domaines ayant fait l'usage de la statistique. Les définitions proposées ici, sont basées sur celles de Mansour (2007) et de Baccini (2010) :

- Population : ensemble étudié ;
- Individu ou unité statistique : élément de l'ensemble ;
- Échantillon : sous-ensemble de la population ;
- Taille de l'échantillon : cardinal de l'échantillon, i.e. nombre d'individus qu'il contient ;

- Effectif total : nombre d'éléments d'une population ;
- Enquête statistique : opération consistant à observer (mesurer, questionner, …) l'ensemble des individus d'un échantillon ;
- Recensement ou enquête exhaustive : enquête dans laquelle l'échantillon observé est la population tout entière ;
- Sondage ou enquête non exhaustive : enquête dans laquelle l'échantillon observé est un sous-ensemble strict de la population ;
- Données statistiques : désigne l'ensemble des individus observés (de l'échantillon), l'ensemble des variables considérées et les observations de ces variables sur ces individus, généralement présentées sous forme de tableaux statistiques (lignes : individus et colonnes : variables).
- Caractère C : caractéristique étudiée ;
- Modalité : différentes situations possibles du caractère (de deux à plusieurs), sont à la fois incompatibles et exhaustives (chaque individu présente une et une seule des modalités d'un caractère) ;
- Variable statistique X : caractéristique (âge, sexe, salaire, …) définie sur la population et observée sur l'échantillon, d'un point de vue mathématique, application définie sur l'échantillon, sachant que :
    - x_i : r observations distinctes de la variable X, sachant que $\{x_i\ ;\ i = 1, \dots, r\}$ et $\sum_{i=1}^{r} x_i \leq \sum_{i=1}^{k} C_i = C$;
- Effectif d'une modalité n_i : si une population statistique de n individus est décrite par un caractère C dont les k modalités sont $\mathrm{C_1}, \mathrm{C_2}, \mathrm{C_3}, \dots, \mathrm{C_k}$ et si $\mathrm{n_i}$ est le nombre d'individus présentant la modalité $\mathrm{C_i}$ alors :
    - $\sum_{i=1}^{k} n_i = n$,
- Effectif cumulé N_i : nombre d'observations inférieures ou égales à x_i :
    - $\sum_{j=1}^{i} n_j = N_i$,
- Fréquence d'une modalité f_i : nombre de réplications associées à une modalité
    - $f_i = \frac{n_i}{n}$;
- Fréquence cumulé F_i : fréquence de l'effectif cumulé N_i
    - $\sum_{j=1}^{i} f_j = F_i$;

- Variable quantitative : application à valeurs dans $\mathbb{R}$ (ensemble des nombres réels) ou dans une partie de $\mathbb{R}$, prend des valeurs numériques, est de type âge, salaire, taille, … ;

- Variable qualitative : n'est pas mesurable, prend des valeurs non numériques, est de type sexe, catégorie socio-professionnelle, … ;

- Variable discrète : ne peut prendre que des valeurs ponctuelles mais pas forcément entières ;

- Variable continue : peut prendre toutes les valeurs numériques d'un intervalle donné.

Objectifs de la statistique descriptive

[Mansour, 2007]

La statistique descriptive a pour objectif d'étudier la répartition d'un ou plusieurs caractère(s) d'une population ou d'un échantillon. Les étapes préconisées sont :

1. Collecte de données : pour une population ciblée il s'agit de relever les valeurs des caractères étudiés ;

2. Présentation des données : la population peut être décrite via un ou plusieurs caractère(s) C_i, grâce à leur fréquence f_i dans un tableau statistique qui peut être traduit en graphe pour réaliser une synthèse visuelle ;

Tableau 26 : Exemple de tableau statistique

Observations i	**Valeurs** x_i	**Effectifs** n_i	**Effectifs cumulés** N_i	**Fréquences** f_i	**Fréquences cumulés** F_i
1	14	4	4	0,27	0,27
2	15	3	7	0,2	0,47
3	21	3	10	0,2	0,67
4	23	2	12	0,13	0,8
5	24	2	14	0,13	0,93
6	29	1	15	0,07	1
Total	**-**	**15**	**-**	**1**	**-**

3. Résumé des données : les données statistiques sont résumées grâce à un certain nombre de paramètres (moyenne, variance, médiane, …).

Résumés numériques des données

[Baccini, 2010], [Mansour, 2007]

Les résumés numériques permettent de synthétiser les données étudiées grâce à certaines valeurs :

1. Mesures de tendance centrale *ou* de position *ou* de localisation : fournissent un ordre de grandeur des données étudiées en situant le centre, le milieu via notamment :

    - La médiane : partage les observations en deux ensembles d'effectifs égaux (50 % des observations sont plus petits que la médiane et 50 % plus grandes). Il s'agit d'un paramètre robuste car peu sensible aux valeurs extrêmes. Il est utilisé lorsque les données sont très dissymétriques (i.e. certaines valeurs sont très grandes et/ou très petites par rapport à la plupart des observations) ;

    - La moyenne : somme des n observations divisée par le nombre total n observations, paramètre ayant une propriété géométrique et physique puisque c'est un barycentre, i.e. un centre de gravité. Il s'agit du paramètre le plus naturel fournissant un résultat sans ambiguïté mais pouvant être faussé si les données sont très dissymétriques ;

2. Mesures de dispersion : permettent de préciser la variabilité des données, i.e. résument l'éloignement, l'écartement de l'ensemble des observations au regard de leur tendance centrale via notamment :

    - L'étendue, $x_{max} - x_{min}$: l'écart entre la plus grande et la plus petite des observations ; cette mesure est peu fiable puisqu'elle est liée à ces deux valeurs extrêmes, cependant elle permet d'avoir une première idée de la dispersion des observations ;

    - L'intervalle interquartiles, $x_{\frac{3}{4}} - x_{\frac{1}{4}}$: l'écart entre le 3e et le 1e quartile (25 % des observations ont des valeurs inférieures au 1e quartile q_1 et 25 % supérieures au 3e quartile q_3, entre le 1e et le 3e quartile autour de la médiane se trouvent les 50 % restants). Cette mesure indépendante des valeurs extrêmes, est très fiable ;

    - Variance : moyenne des carrés des écarts à la moyenne, i.e. moyenne des carrés moins la moyenne au carré. Elle caractérise la dispersion des observations de la variable X autour de sa moyenne ;

    - Ecart-type : racine carrée de la variance, i.e. racine carrée de la moyenne des carrés des écarts à la moyenne, paramètre ayant une propriété physique puisqu'il correspond à une inertie, l'intervalle contenant la moyenne moins l'écart-type et la moyenne plus l'écart-type représente approximativement les 2/3 des données.

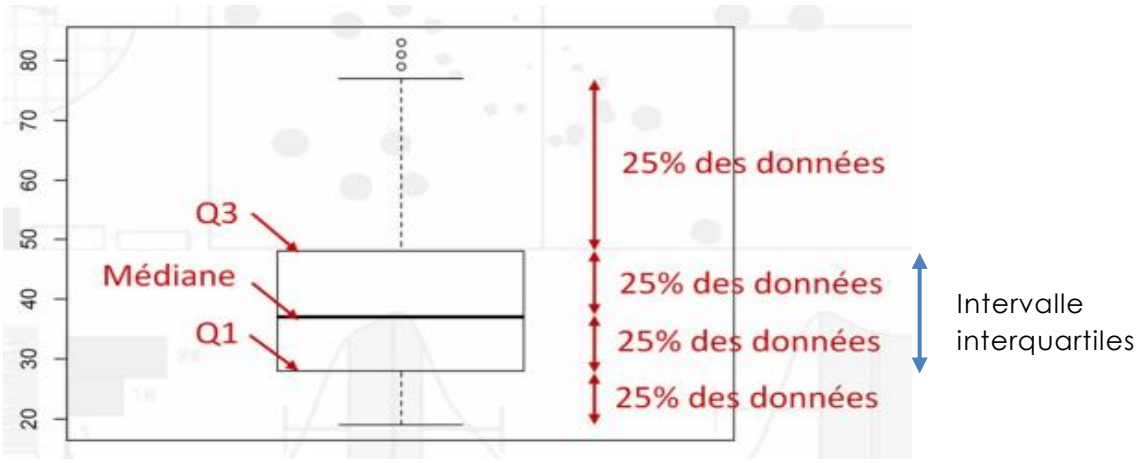


Figure 16 : représentation de certaines mesures (médiane, quartiles, intervalle interquartiles)

Ainsi, un « quantile d'ordre $\propto [0 \leq \propto \leq 1]$, noté $q_{\propto}$, est tel que la proportion des observations qui lui sont inférieures ou égales vaut $\propto$, tandis que la proportion des observations qui lui sont supérieures vaut $1-\propto$ » [Baccini, 2010]. Autrement dit c'est la solution de l'équation :

$$F(q_{\propto}) = \propto \qquad \text{avec } F(q) \text{ : fréquence cumulée}$$

Ainsi, les quantiles les plus utilisées sont les suivants :

- $\propto = \frac{1}{2}$: médiane, noté Q_2 ou $q_{1/2}$, où 50 % des données sont inférieurs à Q_2 ;
- $\propto = \frac{1}{4}$: 1^e quartile, noté Q_1 ou $q_{1/4}$, où 25 % des données sont inférieurs à Q_1 ;
- $\propto = \frac{3}{4}$: 3^e quartile, noté Q_3 ou $q_{3/4}$, où 75 % des données sont inférieurs à Q_3 ;

Autrement dit les quantiles sont des valeurs permettant de diviser une série statistique ordonnée en plusieurs intervalles ayant la même proportion de données. Ainsi s'il y a n quantiles, il y a n+1 intervalles. La médiane, qui correspond au 50^e quantile permet de diviser en deux intervalles identiques le jeu de données. Et les quartiles, q_1, q_2, q_3, au nombre de 3 permettent de séparer le jeu de données en 4 intervalles interquartiles comprenant chacun 25 % des données comme cela est représenté sur la Figure 16.

ANNEXE C : SYSTEME DE QUESTIONNEMENT POUR ELICITER LES DISTRIBUTIONS DE PROBABILITES DE L'IMPACT D'UN COUPLE 'ALEA/RISQUE' SUR LE COMPOSANT LUI-MEME

L'annexe présente le système de questionnement des experts pour éliciter les distributions de probabilités de l'impact d'un couple 'aléa/risque' sur le composant lui-même.

Questionnement présenté pour l'aléa 'EN SITE OCCUPE' :

Lorsque que vous avez eu un projet de construction avec des ETICS lors de travaux 'EN SITE OCCUPE', quel % (échelle de 0 à 100 %) de dégradation avez-vous rencontrées ?

-> La réponse 100 % signifie que dans 100% des cas où vous avez été sur un projet avec ETICS, l'ETICS a été dégradé parce que les travaux était 'EN SITE OCCUPE'.

-> La réponse 0 % signifie que dans 100% des cas où vous avez été sur un projet avec ETICS, l'ETICS n'a jamais été dégradé parce que les travaux était 'EN SITE OCCUPE'.

Est-ce clair pour vous ?

1. Quelle est le % de dégradation entre 0 et 100 % sur lequel vous êtes prêt à parier (beaucoup) correspondant au % de dégradation que vous avez rencontrées dans les réalisations avec ETICS lors de travaux 'EN SITE OCCUPE' ?

- Si le % de dégradation qui sera vérifié est exactement celui sur lequel vous pariez maintenant alors vous perdez.

- Si le % de dégradation qui sera vérifié se situe entre 0 et le % de dégradation sur lequel vous pariez maintenant ou entre ce % de dégradation et 100 % alors vous gagnez.

Autrement dit quelle est la valeur pour laquelle il y a autant de chance que le % de dégradation que vous avez rencontrées dans les réalisations avec ETICS lors de travaux 'EN SITE OCCUPE' soit en dessous ou au-dessus de cette valeur ?

Vous pariez sur quel % de dégradation ?

2. Ensuite le % de dégradation entre 0 % et la valeur que vous avez donné (sur le même principe) ?

Même raisonnement que précédemment

3. Puis le % de dégradation entre la valeur que vous avez donné en 1. et 100 % (sur le même principe) ?

Même raisonnement que précédemment

Remarque : nous avons choisi de faire 'parier' les gens afin que l'expert sente l'enjeu et réponde le plus sincèrement possible.

ANNEXE D : QUESTIONNAIRE DE CALIBRATION ELABORE POUR LE PROCEDE ETICS

L'annexe présente le questionnaire de calibration élaboré pour le procédé largement diffusé ETICS.

Dans cet exercice, un processus mathématique formel est employé pour déterminer des pondérations objectives afin de mettre en commun les avis d'un groupe d'experts concernant les incertitudes sur des questions liées à un domaine d'étude. Les pondérations sont obtenues à partir de mesure des résultats des experts à une série de questions. Chaque réponse correspond à un essai empirique visant à évaluer les capacités de chacun à fournir des distributions instructives de l'incertitude correspondant à des quantités spécifiques connues pour le sujet d'étude. Les scores de calibrage obtenus ne sont pas une mesure des connaissances, ou de l'intelligence – mais sont simplement prévus pour constituer une base rationnelle pour étalonner des plages de paramètres incertains applicable au jugement d'expert.

Ces questions calibrent la « justesse/précision statistique » de chaque expert et la « valeur informative » ; qui sont combinées en un score représentant une pondération relative permettant d'agréger les valeurs évaluées pour les variables d'intérêts.

Pour toutes les questions, merci de fournir votre « plage vraisemblable » d'incertitude (seuil inférieur : 5 % / seuil supérieur : 95 %), votre « meilleure » estimation ou jugement (50 %), ainsi que les valeurs « intermédiaires » (intermédiaire inférieure : 25 % et intermédiaire supérieure : 75 %).

La plage vraisemblable représente la plage dans laquelle vous pensez qu'il y a une probabilité de 90 % que la réponse « correcte » se trouve dans cette plage. Pour cela vous devrait indiquer, selon votre retour d'expériences, la valeur la plus basse (seuil inférieur) et la plus élevée (seuil supérieur) qui encadrent la réponse « correcte » (c.-à-d. qu'il y a seulement une probabilité de 5 % que la valeur soit plus basse que votre seuil inférieur, et une probabilité de seulement 5 % qu'elle soit plus haute que votre seuil supérieur).

Votre « meilleure » estimation devrait être la valeur médiane (50e centile) de la distribution. La forme de distribution ne doit pas nécessairement être symétrique par rapport à la médiane.

Enfin les valeurs « intermédiaires » inférieure et supérieure sont contenues d'une part entre le seuil inférieur et votre « meilleure » estimation et d'autre part entre votre « meilleure » estimation et le seuil supérieur. Pour chacun des cas, quel est selon vous la valeur la plus vraisemblable entre les deux valeurs qui l'encadrent. Pour la valeur intermédiaire inférieure, pour quelle valeur la plus vraisemblable existe-t-il une probabilité de 20 % que la valeur exacte soit entre votre seuil inférieur et votre valeur la plus vraisemblable et une probabilité de 25 % que la valeur exacte soit entre votre valeur la plus vraisemblable et votre « meilleure » estimation ? Pour la valeur intermédiaire supérieure, pour quelle valeur la plus vraisemblable existe-t-il une probabilité de 25 % que la valeur exacte soit entre votre « meilleure » estimation et votre valeur la plus vraisemblable et une probabilité de 20 % que la valeur exacte soit entre votre valeur la plus vraisemblable et votre seuil supérieur ?

En outre la forme de distribution ne doit pas nécessairement être symétrique par rapport aux valeurs intermédiaires.

1	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (système collé) ayant fait l'objet d'une déclaration de sinistre à caractère décennal (2006 - 2015), sur 100 ouvrages de type résidentiel, quel est le pourcentage (%) de sinistre de type fissuration de l'enduit ?	5	25	50	75	95
2	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (système collé) ayant fait l'objet d'une déclaration de sinistre à caractère décennal (2006 - 2015), sur 100 ouvrages de	5	25	50	75	95

	type résidentiel, quel est le pourcentage (%) de sinistre de type décollement de l'ensemble du complexe concernant le résidentiel ?					
3	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (système collé) ayant fait l'objet d'une déclaration de sinistre à caractère décennal (2006 - 2015), sur 100 ouvrages de type résidentiel, quel est le pourcentage (%) de sinistre de type décollement de l'enduit ?	5	25	50	75	95
4	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (système fixé mécaniquement) ayant fait l'objet d'une déclaration de sinistre à caractère décennal (2006 - 2015), sur 100 ouvrages de type résidentiel, quel est le pourcentage (%) de sinistre de type fissuration de l'enduit ?	5	25	50	75	95
5	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (système fixé mécaniquement) ayant fait l'objet d'une déclaration de sinistre à caractère décennal (2006 - 2015), sur 100 ouvrages de type résidentiel, quel est le pourcentage (%) de sinistre de type décollement de l'ensemble du complexe concernant le résidentiel ?	5	25	50	75	95
6	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (système fixé mécaniquement) ayant fait l'objet d'une déclaration de sinistre à caractère décennal (2006 - 2015), sur 100 ouvrages de type résidentiel, quel est le pourcentage (%) de sinistre de type décollement de l'enduit ?	5	25	50	75	95
7	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (tout système confondu) en France, sur 100 ouvrages toutes destinations confondues, en 2015, quel est le pourcentage (%) d'ouvrage isolé par l'extérieur sous enduit sur isolant ?	5	25	50	75	95
8	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur (tout système confondu, sous enduit sur isolant et en bardage sur isolant) en France, sur 100 applicateurs/poseurs, en 2015, quel est le pourcentage (%) n'ayant pas suivi de formation spécifique à l'isolation thermique par l'extérieur ?	5	25	50	75	95
9	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (tout système confondu) en France, en 2015, toutes destinations confondues, quelle est la proportion en pourcentage (%) ayant pour isolant du PSE (blanc et gris graphité) ?	5	25	50	75	95
10	Concernant les systèmes d'isolation thermique par l'extérieur sous enduit sur isolant (tout système confondu) en France, en 2015, sur 100 ouvrages toutes destinations confondues, quel est le pourcentage (%) de la part en rénovation ?	5	25	50	75	95

ANNEXE E : MEDIANE SUR LES RESULTATS DES 7 EXPERTS POUR CHAQUE INDICATEUR DE PERFORMANCE EN PRENANT LA SOMME DES IMPACTS DE CHAQUE COUPLE 'ALEA/RISQUE' SUR CHAQUE INDICATEUR DE PERFORMANCE POUR LES TROIS TYPES DE PONDERATIONS POUR COMBINER LES DONNEES DES EXPERTS - ETICS

Le tableau ci-dessous résume les médianes obtenues pour chaque indicateur pour les trois types de pondérations retenues (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) pour combiner les données des experts. Pour chaque pondération le score Min et le score Max sont donnés. Ils correspondent à l'impact minimum des couples 'aléa/risque' rencontrés par les experts sur les indicateurs de performances, donc celui le moins préjudiciable pour les indicateurs de performances et de même l'impact maximum, le plus préjudiciable pour les indicateurs de performance.

Tableau 27 : Médiane sur les résultats des 7 experts pour chaque indicateur de performance en prenant la somme des impacts de chaque couple 'alea/risque' sur chaque indicateur de performance pour les trois types de pondérations pour combiner les données des experts - ETICS

Expert			Equiprobable		Performance		Expériences	
Cibles	Indicateurs		Min	Max	Min	Max	Min	Max
Qualité d'usage	Confort acoustique	I1	0	1	0	0	0	0,051
	Confort hygrothermique	I2	0	1,143	0	0	0	0,064
	Confort visuel	I3	0	1,714	0	0	0	0,112
	Qualité de l'air intérieur - QAI	I4	0	0,429	0	0	0	0,024
	Qualité de l'eau (sanitaire) - QES	I5	0	0	0	0	0	0
	Entretien et maintenance	I6	1,571	5,429	0,152	0,719	0,263	0,920
	Adaptabilité au comportement des utilisateurs	I7	0	0,714	0	0	0	0,096
	Adéquation à l'usage du bâtiment	I8	0,429	2,286	0,034	0,342	0,044	0,128
	Adéquation à un changement d'usage du bâtiment	I9	0	1,286	0	0	0	0,104
	Intégration urbaine	I10	1,286	3,857	0,025	0,449	0,197	0,635
	Accessibilité	I11	0	0,143	0	0	0	0,040

Expert			Equiprobable		Performance		Expériences	
Cibles	Indicateurs		Min	Max	Min	Max	Min	Max
Robustesse (à la MEO)	Simplicité d'emploi (MEO)	I12	0,429	2,286	0	0,125	0,131	0,460
	Gêne engendrée par la MEO du procédé	I13	0,429	1,714	0,050	0,150	0,204	0,299
	Temps de MEO	I14	0,429	2,429	0	0,075	0,131	0,372
	Nombre de corps d'état impliqués	I15	0	0,571	0	0	0	0,088
Coût global	Coût initial (à la livraison)	I16	0,286	1,571	0	0,274	0,037	0,591
	Coût à la livraison	I17	0,143	2	0	0,222	0,051	0,285
	Coût en exploitation	I18	1,429	4,857	0,120	0,722	0,183	0,964
	Coût de fin de vie	I19	0	0,714	0	0	0	0,040
	Coût d'externalité (Pertes liées à l'exploitation)	I20	0	1	0	0	0	0,056
Énergie & Environnement	Perméabilité à l'air	I21	0	0,571	0	0	0	0,029
	Performance thermique de l'enveloppe	I22	0,286	1,857	0	0,150	0,015	0,329
	Consommation d'énergie primaire totale	I23	0,143	0,857	0	0,150	0,015	0,329
	Changement climatique	I24	0,143	1	0	0	0,007	0,056
	Gestion de l'eau	I25	0	0	0	0	0	0
	Gestion des déchets	I26	0,286	2,286	0	0	0,088	0,204
Sûreté d'usage	Sécurité pour un risque assurable	I27	0,286	1,857	0,068	0,380	0,088	0,810
	Sécurité pour un risque non assurable	I28	0	1,714	0	0,285	0	0,096
	Sécurité utilisateur	I29	0,286	1,857	0,050	0,285	0,037	0,810
Sécurité opérateur		I30	0,143	1	0	0,120	0,022	0,153

ANNEXE F : CLASSEMENT DE LA SENSIBILITE DES INDICATEURS AU REGARD DU TYPE DE PONDERATION POUR COMBINER LES DONNEES DES EXPERTS – ETICS

Les données du tableau de l'Annexe E ci-dessus sont ordonnés dans le tableau suivant afin d'obtenir le classement de la sensibilité des indicateurs pour les trois types de pondérations utilisées.

Tableau 28 : Classement de la sensibilité des indicateurs au regard du type de pondération pour combiner les données des experts – ETICS

Equiprobable		Performance		Expériences	
I6	5,429	I18	0,722	I18	0,964
I18	4,857	I6	0,719	I6	0,920
I10	3,857	I10	0,449	I27	0,810
I14	2,429	I27	0,380	I29	0,810
I8	2,286	I8	0,342	I10	0,635
I12	2,286	I28	0,285	I16	0,591
I26	2,286	I29	0,285	I12	0,460
I17	2	I16	0,274	I14	0,372
I22	1,857	I17	0,222	I22	0,329
I27	1,857	I13	0,150	I23	0,329
I29	1,857	I22	0,150	I13	0,299
I3	1,714	I23	0,150	I17	0,285
I13	1,714	I12	0,125	I26	0,204
I28	1,714	I30	0,11977	I30	0,153
I16	1,571	I14	0,075	I8	0,128
I9	1,286	I1	0	I3	0,112
I2	1,143	I2	0	I9	0,104
I1	1	I3	0	I7	0,096
I20	1	I4	0	I28	0,096
I24	1	I5	0	I15	0,088
I30	1	I7	0	I2	0,064
I23	0,857	I9	0	I20	0,056
I7	0,714	I11	0	I24	0,056
I19	0,714	I15	0	I1	0,051
I15	0,571	I19	0	I11	0,040
I21	0,571	I20	0	I19	0,040
I4	0,429	I21	0	I21	0,029
I11	0,143	I24	0	I4	0,024
I5	0	I25	0	I5	0
I25	0	I26	0	I25	0

ANNEXE G : MEDIANE SUR LES RESULTATS DES 7 EXPERTS POUR CHAQUE ALEA EN PRENANT LA SOMME DES IMPACTS DE CHAQUE COUPLE 'ALEA/RISQUE' SUR CHAQUE INDICATEUR DE PERFORMANCE POUR LES TROIS TYPES DE PONDERATION POUR COMBINER LES DONNEES DES EXPERTS– ETICS

Ce tableau résume les médianes obtenues pour chaque aléa pour les trois types de pondérations retenues (équiprobable, en fonction de leur performance à exprimer un jugement et de leurs expériences) pour combiner les données des experts.

Tableau 29 : Médiane sur les résultats des 7 experts pour chaque alea en prenant la somme des impacts de chaque couple 'alea/risque' sur chaque indicateur de performance pour les trois types de pondération pour combiner les données des experts– ETICS

Aléa		Equiprobable		Pondération		Expériences	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
Salissures atmosphériques - Dépôts de poussières atmosphériques sur la finition de l'enduit mince	A1	1	2,286	0	0,038	0	0,548
Éclaboussures dues à la pluie rebondit sur le sol	A2	0,286	2,143	0,019	0,038	0,241	0,723
Micro-organismes - Développement de micro-organismes sur la finition de l'enduit mince	A3	0,429	3,286	0	0,038	0,066	0,729
Défaut de matériaux - Remontée de liant en surface	A4	0,857	3	0,050	0,199	0,175	0,460
Défaut d'exécution - Couche trop épaisse d'enduit mince	A5	0,714	2,429	0,025	0,125	0,197	0,504
Défaut d'exécution ponctuel - Points SINGULIERS NON FAIT	A6	0,429	2,143	0,017	0,095	0,117	0,197
Défaut d'exécution ponctuel - Joints trop ouverts rebouchés à l'enduit	A7	0,714	2,571	0,068	0,222	0,117	0,285
Défaut d'exécution - Liaison avec l'isolant au support assurée par adhérence ou fixations mécaniques non parfaitement assurée	A8	1,429	4,286	0,133	0,474	0,285	1,664
Défaut de conception (mauvais calepinage, ...)	A9	0,286	4	0,025	0,475	0,124	0,635
Opérateur non formé / non sachant	A10	1	6,857	0,025	0,821	0,212	1,051
Travaux en site occupé	A11	0,857	2,571	0,025	0,050	0,131	0,729
Action des habitants, riverains	A12	0,857	3,429	0,100	0,342	0,153	0,767
Pas ou mauvaise préparation du support (non planéité, fissure, …)	A13	0,714	2,714	0,057	0,285	0,131	1,161
Aléas non prévus	A14	0,571	6,857	0	0,821	0,037	1,051

ANNEXE H : COMBINAISON DES DISTRIBUTIONS DE L'IMPACT DES COUPLES 'ALEA/RISQUE' SUR LE COMPOSANT DES 7 EXPERTS POUR LES TROIS TYPES DE PONDERATIONS - ETICS

Ce tableau résume les médianes obtenues pour chaque aléa pour les trois types de pondération retenus pour combiner les données des experts. Le Tableau 20 donne le classement des aléas les plus préjudiciables pour les trois types de pondération utilisés.

Tableau 30 : Combinaison des distributions de l'impact des couples 'alea/risque' sur le composant des 7 experts pour les trois types de pondérations – ETICS

Aléa	Equiprobable			Pondération			Expériences		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
A1	16%	55%	79%	3%	12%	35%	17%	46%	78%
A2	31%	62%	89%	62%	88%	94%	18%	44%	71%
A3	12%	42%	73%	38%	66%	79%	5%	21%	56%
A4	2%	9%	27%	0%	4%	8%	2%	6%	25%
A5	2%	9%	48%	0%	4%	10%	3%	7%	58%
A6	12%	42%	72%	25%	50%	59%	27%	50%	77%
A7	5%	23%	57%	11%	30%	43%	11%	28%	60%
A8	4%	15%	47%	0%	4%	19%	11%	26%	50%
A9	4%	26%	68%	1%	4%	25%	15%	39%	70%
A10	4%	25%	60%	1%	4%	28%	26%	53%	79%
A11	8%	22%	55%	17%	52%	65%	16%	24%	54%
A12	6%	27%	63%	3%	11%	32%	23%	48%	82%
A13	5%	17%	43%	2%	11%	22%	8%	20%	42%
A14	4%	18%	48%	4%	18%	30%	3%	9%	40%

ANNEXE I : MEDIANE SUR LES RESULTATS DES 9 EXPERTS POUR CHAQUE INDICATEUR DE PERFORMANCE EN PRENANT LA SOMME DES IMPACTS DE CHAQUE COUPLE 'ALEA/RISQUE' SUR CHAQUE INDICATEUR DE PERFORMANCE AVEC LA COMBINAISON DES DONNEES POUR UNE PONDERATION EQUIPROBABLE - PIV

Ce tableau résume les médianes obtenues pour chaque indicateur avec une pondération équiprobable pour combiner les données des experts.

Tableau 31 : Médiane sur les résultats des 9 experts pour chaque indicateur de performance en prenant la somme des impacts de chaque couple 'aléa/risque' sur chaque indicateur de performance avec la combinaison des données pour une pondération équiprobable - PIV

Cibles	Indicateurs		Min	Max
Qualité d'usage	Confort acoustique	I1	0	0
	Confort hygrothermique	I2	0,429	1,714
	Confort visuel	I3	0	0
	Qualité de l'air intérieur - QAI	I4	0	0
	Qualité de l'eau (sanitaire) - QES	I5	0	0
	Entretien et maintenance	I6	0	0
	Adaptabilité au comportement des utilisateurs	I7	0	0,143
	Adéquation à l'usage du bâtiment	I8	0	0
	Adéquation à un changement d'usage du bâtiment	I9	0	0
	Intégration urbaine	I10	0	0
	Accessibilité	I11	0	0
Robustesse (à la MEO)	Simplicité d'emploi (MEO)	I12	0	0
	Gêne engendrée par la MEO du procédé	I13	0	0
	Temps de MEO	I14	0	0
	Nombre de corps d'état impliqués	I15	0	0
Coût global	Coût initial (à la livraison)	I16	0	0
	Coût à la livraison	I17	0	0
	Coût en exploitation	I18	0,429	0,571
	Coût de fin de vie	I19	0	0
	Coût d'externalité (Pertes liées à l'exploitation)	I20	0	0
Énergie & Environnement	Perméabilité à l'air	I21	0	0
	Performance thermique de l'enveloppe	I22	1,143	1,714
	Consommation d'énergie primaire totale	I23	0,571	1,143
	Changement climatique	I24	0,143	0,286
	Gestion de l'eau	I25	0	0
	Gestion des déchets	I26	0	0
Sûreté d'usage	Sécurité pour un risque assurable	I27	0	0
	Sécurité pour un risque non assurable	I28	0	0
	Sécurité utilisateur	I29	0	0
Sécurité opérateur		I30	0	0

ANNEXE J : CLASSEMENT DE LA SENSIBILITE DES INDICATEURS AVEC UNE COMBINAISON DES DONNEES POUR UNE PONDERATION EQUIPROBABLE – PIV

Ce tableau donne le classement de la sensibilité des indicateurs. Les données sont les mêmes que celles du tableau de l'annexe précédente, à l'exception qu'elles sont ordonnées.

Tableau 32 : Classement de la sensibilité des indicateurs avec une combinaison des données pour une pondération équiprobable – PIV

Indicateur	Sensibilité
I22	1,714
I2	1,714
I23	1,143
I18	0,571
I24	0,286
I7	0,143
I1	0
I3	0
I4	0
I5	0
I6	0
I8	0
I9	0
I10	0
I11	0
I12	0
I13	0
I14	0
I15	0
I16	0
I17	0
I19	0
I20	0
I21	0
I25	0
I26	0
I27	0
I28	0
I29	0
I30	0

ANNEXE K : COMPARAISON DE LA SENSIBILITE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE DANS LE CAS DE L'ETICS POUR TROIS JEUX DE PONDERATION POUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE (EQUIPROBABLE, ALEATOIRE 1 ET ALEATOIRE 2) DANS LE CAS DE LA COMBINAISON DE DONNEES AU REGARD DE LA PERFORMANCE DES EXPERTS A EXPRIMER DES JUGEMENTS POUR L'IMPACT MAXIMAL DES COUPLES 'ALEA/RISQUE' SUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE

Ce tableau présente la sensibilité des indicateurs de performance au regard de l'intégration du composant ETICS pour les trois jeux de pondération de la famille de performance, ainsi que la pondération associée.

Tableau 33 : Comparaison de la sensibilité des indicateurs de performance dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance

Indicateurs	Id	Jeu équiprobable	
Coût en exploitation	I18	1	0,722
Entretien et maintenance	I6	1	0,719
Intégration urbaine	I10	1	0,449
Sécurité pour un risque assurable	I27	1	0,380
Adéquation à l'usage du bâtiment	I8	1	0,342
Sécurité pour un risque non assurable	I28	1	0,285
Sécurité utilisateur	I29	1	0,285
Coût initial (à la livraison)	I16	1	0,274

Indicateurs	Id	Jeu aléatoire 1	
Entretien et maintenance	I6	8	5,749
Sécurité pour un risque assurable	I27	7	2,660
Adéquation à l'usage du bâtiment	I8	6	2,053
Sécurité utilisateur	I29	6	1,710
Sécurité pour un risque non assurable	I28	5	1,425
Simplicité d'emploi (MEO)	I12	10	1,247
Gêne engendrée par la MEO du procédé	I13	8	1,197
Coût en exploitation	I18	1	0,722

Indicateurs	Id	Jeu aléatoire 2	
Coût en exploitation	I18	6	4,332
Intégration urbaine	I10	6	2,692
Sécurité pour un risque assurable	I27	7	2,660
Sécurité utilisateur	I29	9	2,565
Coût initial (à la livraison)	I16	6	1,645
Entretien et maintenance	I6	2	1,437
Adéquation à l'usage du bâtiment	I8	4	1,369
Consommation d'énergie primaire totale	I23	9	1,346

Indicateurs	Id	Jeu équiprobable	
Coût à la livraison	I17	1	0,222
Gêne engendrée par la MEO du procédé	I13	1	0,150
Performance thermique de l'enveloppe	I22	1	0,150
Consommation d'énergie primaire totale	I23	1	0,150
Simplicité d'emploi (MEO)	I12	1	0,125
Sécurité opérateur	I30	1	0,120
Temps de MEO	I14	1	0,075
Confort acoustique	I1	1	0
Confort hygrothermique	I2	1	0
Confort visuel	I3	1	0
Qualité de l'air intérieur - QAI	I4	1	0
Qualité de l'eau (sanitaire) - QES	I5	1	0
Adaptabilité au comportement des utilisateurs	I7	1	0
Adéquation à un changement d'usage du bâtiment	I9	1	0
Accessibilité	I11	1	0

Indicateurs	Id	Jeu aléatoire 1	
Sécurité opérateur	I30	6	0,719
Intégration urbaine	I10	1	0,449
Coût initial (à la livraison)	I16	1	0,274
Coût à la livraison	I17	1	0,222
Temps de MEO	I14	2	0,150
Performance thermique de l'enveloppe	I22	1	0,150
Consommation d'énergie primaire totale	I23	1	0,150
Confort acoustique	I1	7	0
Confort hygrothermique	I2	4	0
Confort visuel	I3	2	0
Qualité de l'air intérieur - QAI	I4	9	0
Qualité de l'eau (sanitaire) - QES	I5	8	0
Adaptabilité au comportement des utilisateurs	I7	9	0
Adéquation à un changement d'usage du bâtiment	I9	4	0
Accessibilité	I11	4	0

Indicateurs	Id	Jeu aléatoire 2	
Coût à la livraison	I17	6	1,335
Performance thermique de l'enveloppe	I22	7	1,047
Gêne engendrée par la MEO du procédé	I13	5	0,748
Simplicité d'emploi (MEO)	I12	5	0,623
Temps de MEO	I14	6	0,449
Sécurité pour un risque non assurable	I28	1	0,285
Sécurité opérateur	I30	1	0,210
Confort acoustique	I1	2	0
Confort hygrothermique	I2	8	0
Confort visuel	I3	4	0
Qualité de l'air intérieur - QAI	I4	9	0
Qualité de l'eau (sanitaire) - QES	I5	4	0
Adaptabilité au comportement des utilisateurs	I7	10	0
Adéquation à un changement d'usage du bâtiment	I9	2	0
Accessibilité	I11	9	0

Indicateurs	Id	Jeu équiprobable	
Nombre de corps d'état impliqués	I15	1	0
Coût de fin de vie	I19	1	0
Coût d'externalité (Pertes liées à l'exploitation)	I20	1	0
Perméabilité à l'air	I21	1	0
Changement climatique	I24	1	0
Gestion de l'eau	I25	1	0
Gestion des déchets	I26	1	0

Indicateurs	Id	Jeu aléatoire 1	
Nombre de corps d'état impliqués	I15	2	0
Coût de fin de vie	I19	1	0
Coût d'externalité (Pertes liées à l'exploitation)	I20	1	0
Perméabilité à l'air	I21	7	0
Changement climatique	I24	2	0
Gestion de l'eau	I25	7	0
Gestion des déchets	I26	4	0

Indicateurs	Id	Jeu aléatoire 2	
Nombre de corps d'état impliqués	I15	9	0
Coût de fin de vie	I19	6	0
Coût d'externalité (Pertes liées à l'exploitation)	I20	6	0
Perméabilité à l'air	I21	10	0
Changement climatique	I24	2	0
Gestion de l'eau	I25	3	0
Gestion des déchets	I26	9	0

ANNEXE L : COMPARAISON DU CLASSEMENT DES ALEAS LES PLUS PREJUDICIABLES DANS LE CAS DE L'ETICS POUR TROIS JEUX DE PONDERATION POUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE (EQUIPROBABLE, ALEATOIRE 1 ET ALEATOIRE 2) DANS LE CAS DE LA COMBINAISON DE DONNEES AU REGARD DE LA PERFORMANCE DES EXPERTS A EXPRIMER DES JUGEMENTS POUR L'IMPACT MAXIMAL DES COUPLES 'ALEA/RISQUE' SUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE

Ce Tableau 25 présente l'incidence des différents jeux de pondération attribués aux indicateurs de performance sur les aléas les plus préjudiciables pour la performance globale du bâtiment.

Tableau 34 : Comparaison du classement des aléas les plus préjudiciables dans le cas de l'ETICS pour trois jeux de pondération pour les indicateurs de performance (équiprobable, aléatoire 1 et aléatoire 2) dans le cas de la combinaison de données au regard de la performance des experts à exprimer des jugements pour l'impact maximal des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance

Aléas	Id	Jeu équiprobable
Opérateur non formé / non sachant	A10	0,821
Aléas non prévus	A14	0,821
Défaut de conception (mauvais calepinage, ...)	A9	0,475
Défaut d'exécution - Liaison avec l'isolant au support assurée par adhérence ou fixations mécaniques non parfaitement assurée	A8	0,474
Action des habitants, riverains	A12	0,342

Aléas	Id	Jeu aléatoire 1
Opérateur non formé / non sachant	A10	3,952
Aléas non prévus	A14	3,388
Défaut d'exécution - Liaison avec l'isolant au support assurée par adhérence ou fixations mécaniques non parfaitement assurée	A8	2,294
Action des habitants, riverains	A12	1,482
Pas ou mauvaise préparation du support (non planéité, fissure, reste de colle ou de revêtement, …)	A13	1,330

Aléas	Id	Jeu aléatoire 2
Opérateur non formé / non sachant	A10	4,791
Aléas non prévus	A14	4,585
Défaut de conception (mauvais calepinage, ...)	A9	2,789
Défaut d'exécution - Liaison avec l'isolant au support assurée par adhérence ou fixations mécaniques non parfaitement assurée	A8	2,368
Action des habitants, riverains	A12	2,280

Aléas	Id	Jeu équiprobable
Pas ou mauvaise préparation du support (non planéité, fissure, reste de colle ou de revêtement, …)	A13	0,285
Défaut d'exécution ponctuel - Joints trop ouverts rebouchés à l'enduit	A7	0,222
Défaut de matériaux - Remontée de liant en surface	A4	0,199
Défaut d'exécution - Couche trop épaisse d'enduit mince	A5	0,125
Défaut d'exécution ponctuel - Points SINGULIERS NON FAIT	A6	0,095
Travaux en site occupé	A11	0,050
Salissures atmosphériques - Dépôts de poussières atmosphériques sur la finition de l'enduit mince	A1	0,038
Éclaboussures dues à la pluie qui rebondit sur le sol	A2	0,038
Micro-organismes - Développement de micro-organismes sur la finition de l'enduit mince	A3	0,038

Aléas	Id	Jeu aléatoire 1
Défaut de conception (mauvais calepinage, ...)	A9	1,140
Défaut d'exécution ponctuel - Joints trop ouverts rebouchés à l'enduit	A7	0,770
Défaut de matériaux - Remontée de liant en surface	A4	0,723
Défaut d'exécution - Couche trop épaisse d'enduit mince	A5	0,548
Travaux en site occupé	A11	0,399
Salissures atmosphériques - Dépôts de poussières atmosphériques sur la finition de l'enduit mince	A1	0,171
Micro-organismes - Développement de micro-organismes sur la finition de l'enduit mince	A3	0,171
Éclaboussures dues à la pluie qui rebondit sur le sol	A2	0,133
Défaut d'exécution ponctuel - Points SINGULIERS NON FAIT	A6	0,095

Aléas	Id	Jeu aléatoire 2
Défaut d'exécution ponctuel - Joints trop ouverts rebouchés à l'enduit	A7	1,283
Défaut de matériaux - Remontée de liant en surface	A4	0,873
Pas ou mauvaise préparation du support (non planéité, fissure, reste de colle ou de revêtement, …)	A13	0,855
Défaut d'exécution ponctuel - Points SINGULIERS NON FAIT	A6	0,570
Défaut d'exécution - Couche trop épaisse d'enduit mince	A5	0,548
Travaux en site occupé	A11	0,249
Éclaboussures dues à la pluie qui rebondit sur le sol	A2	0,190
Salissures atmosphériques - Dépôts de poussières atmosphériques sur la finition de l'enduit mince	A1	0,152
Micro-organismes - Développement de micro-organismes sur la finition de l'enduit mince	A3	0,152

ANNEXE M : QUALITES, LIMITES ET PERSPECTIVES DE LA METHODE

Ce tableau résume les remarques et questions soulevées sur la méthode proposée pour chaque étape de la méthode.

Tableau 35 : Qualités, limites et perspectives de la méthode

		Qualités / points forts	Limites	Améliorations / Perspectives
Processus préliminaire	**Etape A : Construction famille de performance**	- Formalise la performance globale du bâtiment - Approche systémique - Adaptable au cas par cas		
	Etape B : Choix processus	Adaptabilité au regard de l'information disponible pour le composant de construction à étudier -> convient à des composants largement diffusés comme innovants		
Processus principal	**Etape 1 : Identification couples 'aléa/risque'**	- Identification d'une majorité de couples 'aléa/risque' liée à un composant de construction sur tout le cycle de vie du bâtiment - Prise en compte de l'incertitude via un aléa représentant l'incertitude	Tous les couples 'aléa/risque' ne peuvent être recensés	Laisser l'opportunité au panel d'experts de proposer des nouveaux couples 'aléa/risque' lors de l'étape 3-2 pour recenser les couples oubliés ou émergents dans le temps
	Etape 2 : Sélection panel d'experts	Panel représentatif des différents métiers de l'ensemble du cycle de vie du bâtiment avec une vision spécialiste ou globale au regard du composant -> Obtention d'un REX sur l'ensemble du cycle de vie avec des visions métiers différentes -> REX systémique	Nécessite un grand nombre de personnes mobilisables (entre 2 et 3h) pour contribuer Si la BdD est actualisée, nécessite des personnes mobilisables tous les ans, voire 2 fois par an	Faire des campagnes de recrutement régulières pour alimenter en continue la BdD
	Etape 3-1 : Pondération des experts	-Evaluation de la capacité d'un expert à estimer des valeurs incertaines -> Optimise la combinaison des estimations des experts pour avoir une meilleure estimation de l'incertitude	Nécessité d'avoir des données les plus fiables possibles sur le composant permettant la construction du questionnaire	Affiner au fur et à mesure des connaissances acquises sur le composant le questionnaire de pondération

	Qualités / points forts	Limites	Améliorations / Perspectives
Etape 3-2 Construction BdD	- Création d'une BdD 'aléa/impact' pour un composant de construction sur tout le cycle de vie du bâtiment permettant d'estimer l'impact du composant sur la performance globale - Impact des couples 'aléa/risque' estimer par les experts sous forme de distribution de probabilités	- L'échelle (de 1 à 5 avec impact min et max) choisie pour estimer l'impact des couples 'aléa/risque' liés au composant sur les indicateurs de performance n'apporte pas assez de précision - La méthode ne permet pas aux experts d'ajouter un couple 'aléa/risque qu'ils jugent important à mentionner et prendre en compte	- Demander aux experts d'estimer sous forme de distributions de probabilités (comme pour les variables de calibration et l'impact sur le composant lui-même) l'impact des couples 'aléa/risque' liés au composant sur les indicateurs de performance - Offrir la possibilité aux experts d'ajouter des couples 'aléa/risque' s'ils le jugent nécessaire
Etape 4 : Evaluation influence composant 'largement diffusé'	- Estimation de l'impact d'un composant de construction intégré sur la performance globale du bâtiment sur tout le cycle de vie du bâtiment -> Aléas les plus préjudiciables pour le composant en lui-même -> Aléas les plus préjudiciables pour la performance globale du bâtiment -> Indicateurs les plus sensibles lorsque que le composant est intégré - Comparaison possible entre les indicateurs car échelle basée sur le même principe - Possibilité de donner un poids à chaque indicateur de performance au regard de la performance souhaitée pour un projet de construction et ce qui permet de déterminer l'impact du composant au regard de la performance globale à atteindre pour un projet de construction/rénovation donné	L'estimation des aléas les plus préjudiciables pour la performance globale du bâtiment et des indicateurs les plus sensibles basée sur une échelle pas assez précise	- Comparer les différents impacts estimer sous forme de distributions de probabilités (sur le composant lui-même et sur les indicateurs de performance) pour pouvoir comparer l'impact de l'intégration du composant à l'échelle du bâtiment et à l'échelle du composant - Tirage aléatoire des experts pour combinaisons de données

		Qualités / points forts	Limites	Améliorations / Perspectives
Processus secondaire	**Etape I : Sélection panel d'experts**	Panel représentatif des différents métiers des étapes du cycle de vie pour lequel il existe des REX pour le composant innovant étudié (souvent jusqu'à la MEO ok, ensuite plus difficile) du bâtiment avec une vision spécialiste ou globale au regard du composant -> Obtention d'un REX sur la partie amont du cycle de vie avec des visions métiers différentes -> REX systémique	-Pour un composant innovant : difficulté de "recruter des experts en aval du cycle de vie du bâtiment (exploitation,…) -> REX non représentatif de l'ensemble du cycle de vie mais des étapes pour lesquelles le composant innovant est intégré - Les experts ne peuvent être calibrés car trop peu de connaissance sur le composant innovant ne permettant pas la réalisation d'une pondération au regard de leur performance	Faire des campagnes de recrutement régulières pour recruter au fur et à mesure des personnes représentatives de l'ensemble du cycle de vie du bâtiment et des métiers - Faire une vieille pour accumuler des connaissances/données fiables sur le composant innovant afin d'anticiper le questionnaire de calibration lorsque le composant passera par le processus principal
	Etape II : Identification couples 'aléa/risque'	- Identification des premiers couples 'aléa/risque' lié à un composant de construction sur les premières étapes du cycle de vie du bâtiment, voire sur l'ensemble des étapes - Proposition de couples 'aléa/risque' hypothétiques pouvant oui ou non se réaliser	Les couples 'aléa/risque' proposés par le panel d'experts peuvent être une "projection" au regard de leurs connaissances sur d'autres composants de la même catégorie - Estimation de l'impact incertaine puisque peu de retour d'expériences et parfois hypothétique	
	Etape III : Evaluation influence composant 'innovant'	- Propose une première estimation des indicateurs les plus sensibles pour le composant de construction étudié	-Estimation des indicateurs les plus sensibles à valeur indicative seulement	

ANNEXE N : BONNES PRATIQUES, PROBLEMES ET APPRENTISSAGES SUITE A L'EXPERIMENTATION DE LA METHODE

Ce tableau résume les bonnes pratiques, les difficultés et les apprentissages mis en exergue par l'expérimentation pour chaque étape de la méthode.

Tableau 36 : Bonnes pratiques, problèmes et apprentissages suite à l'expérimentation de la méthode

			Bonnes pratiques	Difficultés	Apprentissages
Processus préliminaire	**Etape A : Construction famille de performance**	**Etape A : Construction famille de performance**	- Bien définir les objectifs de performance à atteindre - Synthétiser les indicateurs pour éviter les redondances et dépendances entre eux - Observer les famille de performance déjà existantes - Faire en sorte que les indicateurs de performance soient compris de tous les acteurs de la construction		
	Etape B : Choix processus	**Etape B-a : Choix processus - Composant diffusé ?**			
		Etape B-b : Choix processus - REX dispo ?		- Pas toujours l'opportunité d'avoir accès aux REX existants	

			Bonnes pratiques	Difficultés	Apprentissages
Processus principal	Etape 1 : Identification couples 'aléa/risque'	Etape 1 : Identification couples 'aléa/risque'			
	Etape 2 : Sélection panel d'experts	Etape 2 : Sélection panel d'experts	- Demander à un très grand nombre de personnes potentielles - S'appuyer sur les réseaux de contacts existants - Garantir la confidentialité	- Difficulté à "recruter" des experts contribuant à la méthode - Nécessite des experts ayant un minimum de REX avec le composant étudié	- Présenter la méthode et les résultats obtenus pour un composant déjà étudié pour intéresser les potentiels experts - Rémunérer ou proposer une compensation aux experts
	Etape 3-1 : Pondération experts	Etape 3-1a : Pondération experts - Préparation questionnaire	- Préciser un maximum chaque question pour lever des ambiguïtés éventuelles	- Connaissances/données fiables sur le composant pas toujours disponibles -> difficultés à proposer des questions	- Bien préparer les questions et les tester au préalable pour s'assurer qu'elles soient comprises, sans ambiguïté
		Etape 3-1b : Pondération experts - Soumission questionnaire	- Ne pas influencer les experts dans leurs réponses lors des entretiens		
		Etape 3-1c : Pondération experts - Détermination poids experts			

		Bonnes pratiques	Difficultés	Apprentissages
Etape 3-2 Construction BdD	**Etape 3-2a : Construction BdD - Création matrice**	- Construire un questionnaire ergonomique et facile à utiliser pour les experts	- Si le questionnaire est trop compliqué : -> nécessite une assistance pour le remplissage ; -> Risque de biais dans les réponses des experts car mauvaise compréhension	Bien réfléchir au préalable (avant de créer le questionnaire) aux questions que l'on se pose : Que veut-on savoir/déterminer ? Pourquoi ? Pour savoir dans quelle direction aller ? Quelles données récolter ?
	Etape 3-2b : Construction BdD - Contribution matrice	- Ne pas influencer les experts dans leurs réponses lors des entretiens	- L'expert demande parfois confirmation de ses réponses, éviter de donner son avis ou d'influencer les réponses - Risque de biaiser les résultats des experts	- Rester neutre lors des entretiens avec les experts, aussi bien pour poser les questions, que lors de l'écriture des réponses (ne pas interpréter, juste noter et demander aux experts de bien préciser leurs réponses)
	Etape 3-2c : Construction BdD - Création BdD	- Optimiser la BdD pour l'exploitation des résultats	- Comment créer une BdD où à la fois : - l'ensemble des résultats de tous les experts est réunis ; - les données sont facilement exploitables et exportables pour leur analyse ?	- Créer une BdD 'aléa/impact' avec l'ensemble des résultats - Créer des tableaux de données en fonctions des analyses à effectuer
Etape 4 : Evaluation influence composant	**Etape 4-a : Evaluation influence composant - Suffisamment REX**		- Comment évaluer, juger qu'il y a suffisamment de REX ?	- Prendre avec précaution les résultats de l'analyse de données avec peu d'experts

	Bonnes pratiques	Difficultés	Apprentissages
Etape 4-b : Evaluation influence composant - Analyse de données	- Bien définir chaque résultat à obtenir pour déterminer quel outil est à utiliser pour la fusion et l'analyse des données - Ne pas chercher des outils compliqués quand des outils ou indicateurs simples suffisent au regard du besoin		- Prendre avec précaution les résultats de l'analyse de données avec peu d'experts
Etape 4-b1 : Evaluation influence composant - Indicateurs sensibles		- Combinaison des données pas évidente avec l'échelle actuelle (1 à 5, impact pour le min et le max) -> sera plus facile avec la distribution de probabilités	- Prendre avec précaution les résultats de l'analyse de données avec peu d'experts
Etape 4-b2 : Evaluation influence composant - Aléas préjudiciables (bâtiment)		- Combinaison des données pas évidente avec l'échelle actuelle (1 à 5, impact pour le min et le max) -> sera plus facile avec la distribution de probabilités	- Prendre avec précaution les résultats de l'analyse de données avec peu d'experts
Etape 4-b3 : Evaluation influence composant - Aléas préjudiciables (composant)	- Utilisation du même logiciel et donc des mêmes protocoles de calculs pour combiner les données selon les trois pondérations choisies (équiprobable, au regard de leur performance, au regard de l'expérience)	- La pondération utilisée ne donne pas les mêmes résultats -> nécessite de s'assurer de choisir la pondération la plus fiable pour obtenir des données les plus proches de la réalité	- Prendre avec précaution les résultats de l'analyse de données avec peu d'experts

			Bonnes pratiques	Difficultés	Apprentissages
Processus secondaire	**Etape I : Sélection panel d'experts**	**Etape I : Sélection panel d'experts**	- Demander à un très grand nombre de personnes potentielles - S'appuyer sur les réseaux de contact existants - Garantir la confidentialité	- Le panel d'experts peu manquer de représentativité aussi bien sur le cycle de vie que sur les métiers du domaine	- Ne pas hésiter à demander à des personnes ayant peu de REX avec le composant étudié (au stade innovant, tout REX est bon à prendre)
	Etape II : Identification couples 'aléa/risque'	**Etape II-a : Identification couples 'aléa/risque' - Création questionnaire**	- Construire un questionnaire ergonomique et facile à utiliser pour les experts	- Si le questionnaire est trop compliqué : -> nécessite une assistance pour le remplissage ; -> risque de biais dans les réponses des experts car mauvaise compréhension	Bien réfléchir au préalable (avant de créer le questionnaire) aux questions que l'on se pose : Que veut-on savoir/déterminer ? Pourquoi ? Pour savoir dans quelle direction aller ? Quelles données récolter ?
		Etape II-b : Identification couples 'aléa/risque' - Soumission questionnaire	- Ne pas influencer les experts dans leurs réponses lors des entretiens	- L'expert demande parfois confirmation de ses réponses, éviter de donner son avis ou d'influencer les réponses - Risque de biaiser les résultats des experts	- Rester neutre lors des entretiens avec les experts, aussi bien pour poser les questions, que lors de l'écriture des réponses (ne pas interpréter, juste noter et demander aux experts de bien préciser leurs réponses)
	Etape III : Evaluation influence composant	**Etape III-a : Evaluation influence composant - Suffisamment REX**		- Comment évaluer, juger qu'il y a suffisamment de REX ?	- Prendre avec précaution les résultats de l'analyse de données avec peu d'experts

	Bonnes pratiques	Difficultés	Apprentissages
Etape III-b : Evaluation influence composant - Analyse de données	- Bien définir chaque résultat à obtenir pour déterminer quel outil est à utiliser pour la fusion et l'analyse des données - Ne pas chercher des outils compliqués quand des outils ou indicateurs simples suffisent au regard du besoin		- Prendre avec précaution les résultats de l'analyse de données avec peu d'experts
Etape III-b1 : Evaluation influence composant - Identification couples	- Trier l'ensemble des données puis faire dégager les différents couples 'aléa/risque' - Si un couple est cité par un expert, ne pas l'écarter, cela signifie qu'il peut exister - Noter le nombre d'occurrences du couple 'aléa/risque' pour indication (égal ou inférieur au nombre de personnes dans le panel d'experts)	- Risque d'interpréter lors du traitement des données ou de mal faire ressortir les couples 'aléa/risque'	- Tous les couples sont importants à prendre en compte dans le processus secondaire, permet d'être le plus exhaustif possible
Etape III-b2 : Evaluation influence composant - Indicateurs sensibles	- Dans le cas des composants innovants, les résultats issus de l'analyse sont indicatifs	- Combinaison des données pas évidente avec l'échelle actuelle (1 à 5, impact pour le min et le max)	- Prendre avec précaution les résultats de l'analyse de données avec peu d'experts - Question soulevée suite à l'expérimentation : Est-ce vraiment pertinent de demander aux experts d'estimer l'impact des couples 'aléa/risque' sur les indicateurs de performance ?