N° DU : 1668 Année 2006 N° ED : 349

UNIVERSITE BLAISE PASCAL – CLERMONT II

ECOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

Thèse

Présentée par

Aurélie TALON
Ingénieur Génie Civil C/U/S/T/
Formation Doctorale : « Génie Mécanique Génie Civil »

Pour obtenir le grade de :

DOCTEUR D'UNIVERSITE
SPECIALITE : GENIE CIVIL

Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction

Soutenue publiquement le 7 septembre 2006, devant le jury composé de :

Pr.	**Daniel**	**BOISSIER**	**Directeur de thèse**
Pr.	**François**	**BUYLE-BODIN**	**Président**
Dr.	**Jean-Luc**	**CHEVALIER**	**Examinateur**
Pr.	**Youssef**	**DIAB**	**Rapporteur**
Pr.	**Michael A.**	**LACASSE**	**Examinateur**
Pr.	**Jean-Claude**	**MANGIN**	**Rapporteur**

Thèse préparée au ***Centre Scientifique et Technique du Bâtiment – Département Développement Durable – Division Environnement, Produits et Ouvrages Durables*** *et au* ***Laboratoire Génie Civil***

Avant propos

Le travail de thèse présenté dans ce mémoire a été mené au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) – département Développement Durable, division Environnement, Produits et Ouvrages Durables – et au Laboratoire Génie Civil (LGC) de l'Université Blaise Pascal – Clermont II.

Je remercie très sincèrement Monsieur Boissier, Professeur au LGC et au Centre Universitaire des Sciences et Techniques (C/U/S/T) de Clermont-Ferrand, pour la direction de cette thèse et plus particulièrement pour sa disponibilité, son écoute, sa rigueur et sa demande de structuration. Que Messieurs Jean-Luc Chevalier et Julien Hans soient remerciés pour leur encadrement au quotidien et les opportunités qu'ils m'ont offertes au cours de cette thèse. Je suis très reconnaissante envers Jérôme Lair pour m'avoir initiée à la recherche et pour m'avoir encadrée au début de ces travaux.

J'exprime ma sincère reconnaissance à :

- Monsieur François Buyle-Bodin, Professeur et Chef de la Mission Génie Civil à la Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST),
- Monsieur Youssef Diab, Professeur au Laboratoire de Génie Urbain, Environnement et Habitat (LGUEH de l'Université de Marne la Vallée),
- Monsieur Michael A. Lacasse, Directeur de Recherche Sénior à l'Institute for Research in Construction (National Research Council Canada),
- Monsieur Jean-Claude Mangin, Professeur au Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE) et à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Chambéry (ESIGEC – Université de Savoie),

pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail de thèse, de présider le jury, d'en être les rapporteurs et les examinateurs.

Je remercie vivement Messieurs Bruno Daniotti et Pietro Natale Maggi pour m'avoir accueillie au sein de leur département Building Environnement Sciences and Technologies (BEST du Politecnico di Milano) lors de mon séjour en Italie, ainsi que Monsieur Paolo Iacono pour notre travail de comparaison de nos approches.

Je souhaite exprimer mon entière sympathie à toutes les personnes que j'ai côtoyées au CSTB, au LGC, au C/U/S/T et au BEST, tous les ingénieurs, techniciens, professeurs, maîtres de conférence, personnels non enseignants, thésards et stagiaires qui ont rythmés et teintés très agréablement ces années de thèse.

Je vous remercie très chaleureusement et amicalement, Audrey, Claudia, Danielle, Emilie, Isa, Karine, Luc, Maha, Marie, Marisaïdes, Nico, Toto, pour m'avoir soutenue et pour avoir passé des moments « hors thèse » avec vous très appréciables.

Je te suis très reconnaissante, Sabrina, Docteur et voisine de bureau du CSTB, de m'avoir écoutée, encouragée, aidée, conseillée et renseignée pendant ces trois années.

Ma dernière pensée va à mes parents, à mon frère et aux autres membres de ma famille, je vous remercie de tout mon cœur de m'avoir toujours écoutée et soutenue et d'avoir contribué de milles manières à la réalisation de mes projets.

Résumé

Le travail de thèse présenté dans ce mémoire est une méthodologie d'évaluation des profils multi-performances des produits de construction à des dates fixées de leurs vies en œuvre, exploitant l'ensemble des données disponibles (durées, probabilités d'apparition, niveaux de performances), multi-sources et multi-échelles (géométrique, phénoménologique, fonctionnelle et temporelle).

La méthodologie proposée comprend quatre étapes :

- **analyse qualitative** : recherche exhaustive des scénarii de dégradation d'un produit sur la base de la connaissance de son modèle fonctionnel,
- **analyse quantitative temporelle** : évaluation des durées de vie et des probabilités d'apparition des scénarii et gestion de leurs interactions,
- **analyse quantitative de la criticité** : classement puis hiérarchisation par ordre de criticité (combinaison de la durée, de la probabilité et de la gravité) des scénarii,
- **analyse quantitative des performances** : obtention des profils multi-performances.

Cette méthodologie englobe un ensemble de méthodes (par exemple, le traitement des données par unification et agrégation) de base de données et d'outils de représentation, applicables indépendamment les uns des autres.

La méthodologie proposée est illustrée sur une fenêtre fixe, un mur en béton, un mur en briques et un complexe mur en béton et fenêtre.

Mots clefs : agrégation des données, approche multi-échelle, base de données, bâtiment, criticité, données multi-sources, durée de vie, phénomènes de dégradation, probabilité d'apparition, profil multi-performance, qualité des données, scénarii de dégradation, unification des données.

Abstract

The work presented in this Ph.D. thesis represents a methodology for evaluating the multi-attribute performance profiles of building components over a pre-defined and previously established life cycle, taking into account the entire set of possible sources of information that could be derived from many different origins and that relate to various characteristics of a building component's service life thereby incorporating information of geometric, phenomenological, functional and of temporal type.

The proposed methodology comprises four steps :

- **Qualitative analysis**: an exhaustive review of the possible different degradation scenarios of a building component is completed based on knowledge of its functional model;
- **Quantitative analysis applied temporally**: an evaluation of the service life and of the probability of occurrence of the scenarios is carried out as well as the interrelations between scenarios are managed;
- **Quantitative analysis of criticality**: to first classify and then order by degree of criticality the entire set of possible scenarios for which the degree of criticality is based on information related to the duration, the probability of occurrence and the consequences of the scenarios;
- **Quantitative analysis of performance**: a means to obtain multi-attribute performance profiles of the building component.

This methodology, apart from encompassing the use of different methods, also uses a set of databases as an aid to structuring and organizing the information and a set of representation tools that help illustrate the main results of the methodology.

The proposed methodology is illustrated by applying it to the evaluation of a fixed window, a concrete wall, a brick wall and a combined system comprised of a concrete wall incorporating a fixed window.

Key words : aggregation of data, building, criticality, databases, data quality, degradation phenomena, degradation scenarios, multi-attribute performance profile, multi-origin data, multi-scale approach, probability of occurrence, service life, unification of data.

Table des matières

Introduction 1

Partie A – Réponses existantes à la problématique d'évaluation de la durée de vie et de la performance 3

Introduction aux réponses existantes 4

Chapitre I : Problématique générale de la thèse 5
I.1. Problématique industrielle 5
I.2. Problématique académique 9

Chapitre II : Etat de l'art des recherches, méthodes et outils existants 12
II.1. Etat de l'art sur l'analyse des dysfonctionnements 12
II.2. Etat de l'art sur l'analyse de la criticité 20
II.3. Etat de l'art sur l'évaluation de la durée de vie 30
II.4. Etat de l'art sur l'évaluation de la performance 40

Synthèse : problématique choisie 47

Partie B – Méthodologie d'évaluation du profil multi-performance 48

Introduction générale aux propositions 49

Chapitre I : Propositions de méthodes 54
Introduction aux méthodes 54
I.1. Méthode de transformation d'une donnée brute 54
I.2. Méthode de traitement des données élaborées 56
I.3. Méthode d'évaluation de la durée d'un scénario 73
I.4. Méthode d'évaluation de la criticité 86
I.5. Méthode d'évaluation des performances fonctionnelles 98
I.6. Synthèse des méthodes 104

Chapitre II : Propositions de bases de données 105
Introduction aux bases de données 105
II.1. Base de données « agents environnementaux » 105
II.2. Base de données « fonctions » 108
II.3. Base de données « phénomènes » 110
II.4. Base de données « probabilités d'apparition » 113
II.5. Base de données « performances » 115
II.6. Synthèse des bases de données 117

Chapitre III : Propositions d'outils de représentation 118
Introduction aux outils de représentation 118
III.1. Graphe événementiel des défaillances 118
III.2. Arbre des défaillances 120
III.3. Représentations radar 121
III.4. Synthèse des outils de représentation 122

Chapitre IV : Proposition d'une méthodologie 123
Introduction à la méthodologie 123
IV.1. Analyse qualitative 123
IV.2. Analyse quantitative temporelle 128
IV.3. Analyse quantitative de la criticité 130

IV.4. Analyse quantitative des performances 131
IV.5. Présentation des résultats 133
Synthèse de la méthodologie 133

Chapitre V : Perspectives aux propositions 134
V.1. Perspectives aux méthodes 134
V.2. Perspectives aux bases de données 135
V.3. Perspectives aux outils de représentation 136
V.4. Perspectives à la méthodologie 136

Synthèse générale des propositions 137

Partie C – Applications, Analyse critique, Développements industriels 138

Introduction aux applications, à l'analyse critique et aux développements industriels 139

Chapitre I : Applications 141
I.1. Applications de l'analyse qualitative 141
I.2. Applications de l'analyse quantitative temporelle 158
I.3. Applications de l'analyse quantitative de la criticité 181
I.4. Applications de l'analyse quantitative des performances 194

Chapitre II : Analyse critique 206
II.1. Comparaison des applications 206
II.2. Synthèse des hypothèses 209
II.3. Limites et perspectives méthodologiques et applicatives 211

Chapitre III : Développements industriels 213
III.1. Implémentation en conception 213
III.2. Implémentation en inspection, maintenance et réparation 215
III.3. Développement du logiciel 217
III.4. Valorisation industrielle 219

Synthèse aux applications, à l'analyse critique et aux développements 221

Conclusion 222

Références bibliographiques 224

Index des figures 236

Index des tableaux 238

Annexes 241

Glossaire

Actions / *stresses* :
Elles sont comprises au sens large du mot (agents, charges, déformations imposées), dues à des phénomènes d'origine naturelle, artificielle ou humaine se produisant dans leur milieu (environnement, ambiance), comme le feu, le vent, l'humidité, les chocs ou les actions provenant d'autres parties de la construction et qui peuvent être appelées dans leur ensemble influences du milieu ou conditions données [CIB, 75].

Agent environnemental / *environmental agent* :
Un agent environnemental est une sollicitation (climatique, mécanique, chimique ou physique) d'une *entité constructive* par son *environnement*.

Agrégation de données / *data aggregation* :
Exploitation de la complémentarité de *données élaborées* relatives à un *point inférieur* de l'*espace des évaluations* pour l'évaluation au *point objectif*.

AMDEC / *FMECA* :
Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité.

Arbre des défaillances / *failure tree* :
Représentation graphique et logique des combinaisons des causes de *dégradations* élémentaires des *composants* entrainant la *défaillance* des *composants* et du *produit*.

Bâtiment / *building* :
Tout ouvrage durable édifié au-dessus du niveau du sol, et ayant une fonction d'abri : ainsi on ne peut appeler bâtiment un mur de clôture, pas plus qu'un pont, un barrage, un tunnel, ou un égout [VIG, 03].

Caractéristique intrinsèque / *intrinsic characteristic* :
Variable permettant de mesurer l'évolution d'un *critère de performance* associé à une *fonction* (*principale ou secondaire*).

Censure des données / *data censure* :
Manque de données due à la limitation de la durée d'observation et au fait que cette observation est discrète.

Composant (d'un produit de construction) / *element (of a building component)* :
Elément d'un *produit* de construction, ayant des propriétés mécano-physico-chimique et une géométrie stable, et remplissant un ensemble de *fonctions* (*principales* et / ou *secondaires*).

Critère de performance / *performance criterion* :
Mesure permettant d'évaluer une performance ; il est associé à une ou une combinaison de *fonction*(s) requise(s) d'un produit.

Criticité d'un scénario / *criticality of a scenario* :
Produit des critères de *probabilité d'apparition*, de durée et de gravité de ce *scénario* pondéré par la croyance que l'on peut accorder aux valeurs prises par ces critères.

Date d'amorce / *start date* :
Date à laquelle démarre un *phénomène* / *scénario*.

Date de fin / *completion date* :
Date pour laquelle un *phénomène* / *scénario* atteint son état de *dégradation* maximal.

Date de réalisation / *realization date* :

Pour un phénomène : date pour laquelle l'état de *dégradation* d'un *phénomène* est égal au *taux de transition* entre ce *phénomène* et le *phénomène* qui le succède.

Pour un scénario : date pour laquelle le dernier *phénomène* atteint l'état de *dégradation* correspondant au *seuil de dysfonctionnement* de la *fonction* associée.

Défaillance (d'une entité constructive) / *failure (of a construction entity)* :

Une *entité constructive* est défaillante lorsqu'au moins une ou une combinaison de ses *fonctions principales* atteint son *seuil de défaillance*.

Dégradation (d'une entité constructive) / *degradation (of a construction entity)* :

C'est une modification des propriétés et / ou de la géométrie de cette *entité* par rapport à ses propriétés et / ou à sa géométrie initiales. Une dégradation est caractérisée par un *phénomène* et un état de dégradation.

Développement durable / *sustainable development* :

Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs [BRU, 87].

Donnée brute ou expérimentale / *rough or experimental data* :

Donnée (collectée) qualitative ou quantitative résultant d'une expérience / épreuve.

Donnée consensuelle / *consensual data* :

Donnée résultant de la méthode de traitement des *données élaborées*.

Donnée élaborée / *elaborated data* :

Donnée résultant de la méthode de transformation d'une *donnée brute*.

Durabilité / *durability* :

Aptitude d'un *bâtiment* ou de ses *composants* à assurer ses *fonctions* requises au delà d'une période spécifiée sous l'influence d'agents climatique et d'usage prévus [ISO, 05a].

Aptitude d'une *entité* à accomplir une (des) *fonction*(s) requise(s) dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un (des) état(s) limite(s) soit (soient) atteint(s) [AFN, 88].

Durée de vie de conception / *design service life* :

Durée de vie recherchée par le concepteur [ISO, 05a].

Durée de vie de référence / *reference service life* :

Durée de vie prévue d'un *produit* / *composant* / assemblage / *système* pour un ensemble particulier, c'est-à-dire de référence, de conditions de service et qui peut être la base de l'estimation d'une durée de vie sous d'autres conditions de service [ISO, 05a].

Durée de vie estimée / *estimated service life* :

Durée de vie prévue d'un *bâtiment* ou des *composants* de *bâtiment* pour un ensemble de conditions de service spécifique, déterminée à partir de données de *durée de vie de référence* en prenant en compte les différences de conditions de service [ISO, 05a].

Durée de vie résiduelle / *residual service life* :

A un instant *t*, laps de temps séparant cet instant et la date correspondant à la fin de la *durée de vie estimée*.

Dysfonctionnement (d'une fonction) / *non-functioning (of a function)* :

Il correspond à un *niveau* particulier du *critère de performance* associé à cette *fonction*, égal au inférieur à son *seuil de dysfonctionnement*.

Echelle fonctionnelle / *functional scale* :

Graduation de l'axe fonctionnel de l'*espace des évaluations*, comportant deux niveaux : mono-fonction et multi-fonction.

Echelle géométrique / *geometric scale* :

Graduation de l'axe géométrique de l'*espace des évaluations*, comportant quatre niveaux : matériau, *composant*, *produit* et *bâtiment*.

Echelle phénoménologique / *phenomenological scale* :
Graduation de l'axe phénoménologique de l'*espace des évaluations*, comportant trois niveaux : *phénomène*, *scénario* et scénarii.

Echelle temporelle / *temporal scale* :
Graduation de l'axe temporel de l'*espace des évaluations*, comportant cinq niveaux : conception, mise en œuvre, exploitation, réhabilitation et déconstruction.

Entité constructive / *construction entity* :
Niveau de l'*échelle géométrique*, qui est soit un matériau, soit un *composant*, soit un *produit*, soit un *bâtiment*.

Environnement d'un système constructif / *environment of a construction system* :
Ensemble des sollicitations climatique et d'usage susceptibles d'affecter une *entité constructive* en service (phase d'exploitation).

Espace des évaluations / *evaluation universe* :
Représentation du caractère multi-échelle de toute donnée.

Fonction principale / *principal function* :
Représentation en termes fonctionnels d'une part du service attendu par l'utilisateur, ce pour quoi le *produit* a été créé, et d'autre part des limitations de la liberté de conception en raison de contraintes externes, telles que la protection de l'environnement, les normes de sécurité, les choix constructifs incontournables.

Fonction secondaire / *secondary function* :
Elles sont mises en œuvre pour satisfaire et réaliser les *fonctions principales*.

Graphe événementiel des défaillances / *event driven graph* :
Représentation graphique de l'enchaînement et / ou de la concomitance des *phénomènes* (de *dégradation*) des *composants* au cours du temps conduisant à la *défaillance* du *produit*.

Imprécision / *imprecision* :
Elle traduit les « défauts » de la modélisation d'une donnée.

Incertitude / *uncertainty* :
Elle décrit la variabilité intrinsèque de la donnée.

Incomplétude / *incompleteness* :
Elle correspond au manque partiel ou total de données.

Indicateurs de qualité / *quality indicators* :
Mesure de la confiance que l'on peut accorder au résultat (*donnée consensuelle*) obtenu.

Interface / *interface* :
Modélisation de la liaison existant entre deux *entités* d'un *système constructif*.

Maintenabilité d'une entité constructive / *maintainability of a construction entity* :
Capacité d'une *entité constructive* à être facilement et rapidement entretenue et à moindre coût après la réalisation d'un *scénario*.

Masse de croyance / *belief mass* :
La masse de croyance évaluée sur [0 ; 1] traduit la confiance que l'on a dans une donnée.

Niveau d'un critère de performance / *level of a performance criterion* :
Valeur numérique et / ou littérale particulière prise par un *critère de performance*.

Niveau de performance d'un produit / *performance level of a building component* :
Valeur numérique et / ou littérale résultant d'une combinaison des *niveaux de critères de performance* d'un *produit*.

Performance / *performance* :
Le mot « performance » (comportement en service) a été choisi pour caractériser le fait qu'un *produit* doit présenter certaines propriétés qui lui permettent de remplir son rôle lorsqu'il est soumis à certaines *actions* [CIB, 75].

Phénomène de dégradation / *degradation phenomenon* :
Ce qui se produit et que l'on peut observer.

Point d'évaluation / *evaluation point* :
Point de l'*espace des évaluations* défini par un quadruplet {niveau géométrique, niveau phénoménologique, niveau fonctionnel, date} ou des données sont disponibles.

Point inférieur / *lower point* :
Point d'évaluation de l'*espace des évaluations* dont tous les niveaux sont inférieurs ou égaux à ceux du *point objectif* avec au moins un niveau strictement inférieur.

Point objectif / *objective point* :
Point d'évaluation de l'*espace des évaluations* où l'on veut obtenir une évaluation.

Probabilité d'apparition / *probability of occurrence* :
Chance qu'un phénomène démarre sur une période d'observation fixée et se poursuive jusqu'à sa *date de réalisation*.

Produit de construction / *building component* :
Elément d'un *bâtiment* remplissant un ensemble de *fonctions*.

Profil multi-performance / *multi-performance profile* :
Représentation de l'ensemble des *niveaux des critères de performance* des *fonctions* et combinaisons de *fonctions* d'une *entité constructive* à un instant de son cycle de vie.

Robustesse d'une entité constructive / *robustness of a construction entity* :
La robustesse d'une *entité constructive* en service, par rapport à un ensemble d'*entités* de même structure, de même fonctionnement et dans les mêmes conditions en service, est définie comme la capacité de cette *entité* à maintenir ses *niveaux de critères de performance* dans le temps supérieurs à ceux des autres *entités*.
Adaptation de la définition proposée dans [REC, 04] au contexte de la construction.

Scénario de dégradation / *degradation scenario* :
Enchaînement de *phénomènes* (de *dégradation*).

Seuil de dysfonctionnement / *non-functioning threshold* :
Valeur particulière du *critère de performance* d'une *fonction* ou d'une combinaison de *fonction*s pour laquelle cette *fonction* ou cette combinaison de *fonctions* n'est plus assurée.

Seuil de défaillance d'une entité constructive / *failure threshold of a construction entity* :
Ensemble de *seuils de dysfonctionnement* pour lequel l'*entité constructive* ne remplit plus ses *fonctions principales*.

Système constructif / *construction system* :
Un système constructif est constitué d'une *entité constructive* et de son *environnement*.

Taux de transition / *transition rate* :
Le taux de transition τ_i^j entre deux *phénomènes* successifs Ph_i^j et Ph_{i+1}^j correspond à la valeur d'état de *dégradation* de Ph_i^j pour laquelle Ph_{i+1}^j peut démarrer.

Unification des données / *data unification* :
Exploitation de la complémentarité de *données élaborées* relatives à un même *point d'évaluation* de l'*espace des évaluations*.

Notations

Indices :

- i : indice associé aux phénomènes,
- j : indice associé aux scénarii,
- k : indice associé aux fonctions,
- l : indice associé aux données ou aux preuves,
- r : indice associé aux critères.

Données :

- EE : espace des évaluations,
- PE : point d'évaluation,
- PO : point objectif,
- PI : point inférieur,
- PS : point supérieur,
- Ph_i^j : phénomène i du scénario j, sans indications contraires un phénomène i sera par défaut associé au scénario j, et sera noté Ph_i,
- Sc_j : scénario j,
- X , Y : deux variables, $\overline{X}$ et $\overline{Y}$ leur norme,
- x , y : réalisations de X et Y , $\overline{x}$ et $\overline{y}$ leur norme,
- D_{brute} : donnée brute,
- $D_{élab}$: donnée élaborée,
- D_{cons} : donnée consensuelle,
- $M(X)$: modèle tel que $Y = M(X)$,
- $M_{norm}(\overline{X})$: modèle normalisé tel que $\overline{Y} = M_{norm}(\overline{X})$,
- $g_{ap}(X)$: fonction d'appartenance,
- η : état de dégradation,
- ξ : probabilité d'apparition,
- μ : niveau de performance,
- κ : caractéristique intrinsèque,
- $\delta(X)$: domaine de X tel que $\delta(X) = [\, X_{\min} \; ; \; X_{\max} \,]$,
- $moy(\delta X)$: moyenne d'un intervalle de valeurs δX .

Qualité et fusion des données :

- Θ : cadre de discernement,
- m_c : masse de croyance,
- $f_{mc}(x)$: fonction de masse de croyance,
- CE_r : critère r d'évaluation de la qualité des données,
- pCE_r : poids associé au critère r,

- H_l : entropie propre de la donnée *l*,
- H_Θ : entropie du cadre de discernement,
- H_{R_l} : entropie relative de la donnée *l*,
- $\mathcal{S}_l$, $\mathcal{R}_l$ et θ : trois sous-ensemble de Θ, où $\mathcal{S}_l$ représente un sous-ensemble à fusionner, R_l un sous-ensemble résultant de la fusion et θ un sous-ensemble quelconque,
- P_l : preuve *l*, qui pointe sur un sous-ensemble $\mathcal{S}_l$ de Θ,
- $C_f(\theta)$: consensus de θ,
- $Bel(\theta)$: croyance en θ,
- $Pl(\theta)$: plausibilité de θ,
- $P(\theta)$: probabilité de Smets de θ,
- $Ind(\theta)$: indicateurs de qualité de θ, avec $Ind(\theta)=\{Bel(\theta);P(\theta);Pl(\theta)\}$.

Quantification temporelle :

- T : variable de temps,
- t : une réalisation de T,
- t_0 : date de début de l'étude,
- t_f : date de fin de l'étude,
- da_i^j : date d'amorce d'un Ph_i^j,
- da^j : date d'amorce d'un Sc_j,
- dr_i^j : date de réalisation d'un Ph_i^j,
- dr^j : date de réalisation d'un Sc_j,
- df_i^j : date de fin d'un Ph_i^j,
- Du_i^j : durée d'un Ph_i^j,
- Du^j : durée d'un Sc_j,
- τ_i^j : taux de transition (état de dégradation particulier) reliant Ph_i^j et Ph_{i+1}^j.

Quantification de la probabilité d'apparition :

- ξ_i^j : probabilité d'apparition d'un Ph_i^j,
- ξ^j : probabilité d'apparition d'un Sc_j,
- $I\xi_i^D$: indicateur de démarrage d'un Ph_i,
- $I\xi_i^{D1}$: indicateur d'environnement associé à un Ph_i,
- $I\xi_i^{D2}$: indicateur de qualité de conception d'un produit associé à un Ph_i,
- $I\xi_i^C$: indicateur de cinétique d'un Ph_i.

Quantification de la criticité :

- G^j : gravité d'un Sc_j,
- $I_{RP}Ph_i$: impact d'un Ph_i sur la robustesse du produit,
- $I_{RP}Sc_j$: impact d'un Sc_j sur la robustesse du produit,

- $I_{MP}Sc_j$: impact de Sc_j sur la maintenabilité du produit,
- $I_{RO}Sc_j$: impact de Sc_j sur la robustesse de l'ouvrage,
- $I_{MO}Sc_j$: impact de Sc_j sur la maintenabilité de l'ouvrage,
- $I_{RMSP}Sc_j$: impact de Sc_j sur la résistance mécanique et la stabilité d'un produit,
- CDu^j : critère de durée d'un Sc_j,
- $p\xi^j$: poids associé au critère de probabilité d'apparition d'un Sc_j,
- $pCDu^j$: poids associé au critère de durée d'un Sc_j,
- pG^j : poids associé au critère de gravité d'un Sc_j,
- Cr^j : criticité d'un Sc_j,
- $Se_{\xi,1}$, $Se_{\xi,2}$: seuils de criticité supérieur et inférieur associés à la probabilité d'apparition d'un scénario,
- $Se_{Du,1}$, $Se_{Du,2}$: seuils de criticité supérieur et inférieur associés à la durée d'un scénario,
- $Se_{G,1}$, $Se_{G,2}$: seuils de criticité supérieur et inférieur associés à la gravité d'un scénario.

Quantification des performances :

- F_k : fonction k assurée par un produit ou par l'un de ses composants,
- κ_i^k : caractéristique intrinsèque associée à un Ph_i et à une F_k,
- μ_i^k : niveau de performance d'une F_k associée à un Ph_i,
- μ_{seuil}^k : seuil de dysfonctionnement d'une F_k,
- $\mu_{déf}$: seuil de défaillance d'une entité constructive, $\mu_{déf} = \{\mu_{seuil}^k\}$,
- $Ic\mu^k$: indicateur de cinétique du niveau de performance d'une F_k.

Introduction

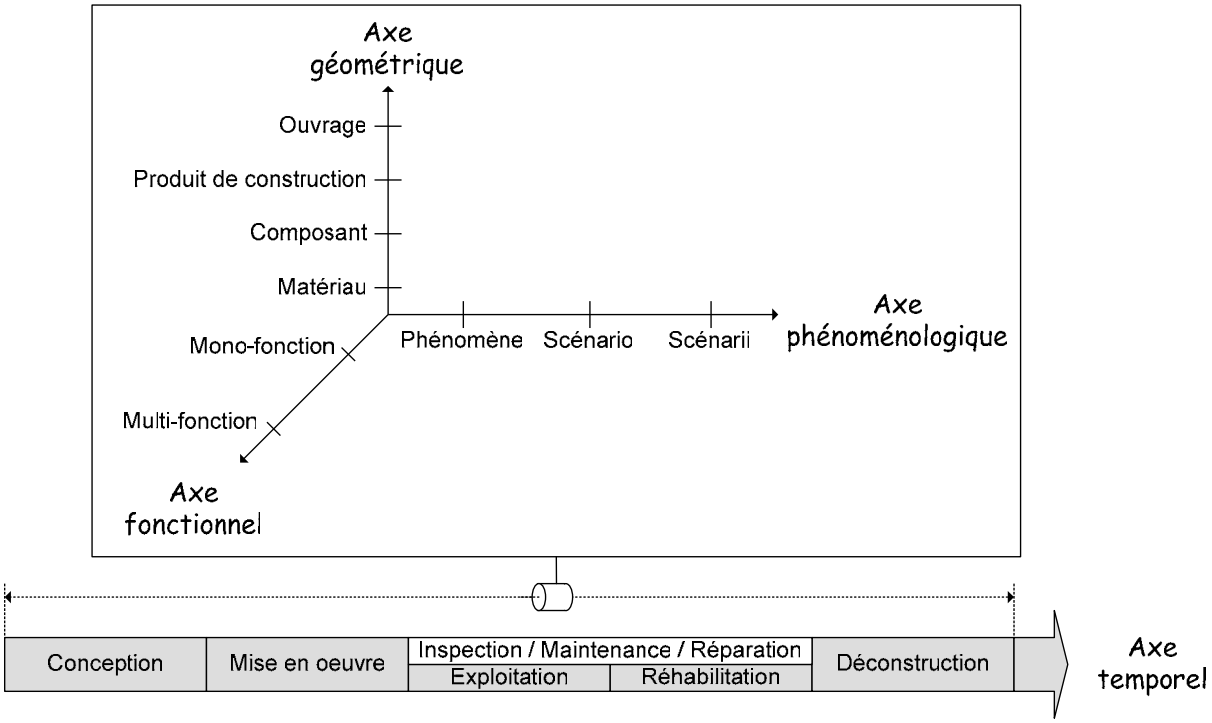
Le « développement durable » tel que l'a défini la premier ministre norvégienne Mme Gro Harlem Brundtland en 1987, est un « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » et est une préoccupation internationale majeure et grandissante. L'essor de cette notion est communément attribué à la conférence des nations unies pour le développement et l'environnement de Rio en 1992 et s'est réaffirmé lors du sommet mondial du développement durable de Johannesburg de 2002. Sur le plan national cette préoccupation s'est concrétisée par l'adoption le 3 juin 2003 de la stratégie nationale du développement durable qui a été renforcée lors du deuxième séminaire gouvernemental du 23 mars 2005 sur le développement durable. Dans le domaine de la construction, les ouvrages tendent à intégrer cette notion de développement durable.
Dans le contexte de la construction, l'évaluation de la durabilité des ouvrages est une activité fondamentale du développement durable qui se traduit par des exigences de pérennité de la performance de l'ouvrage dans le temps.

L'étude de cette pérennité de la performance est d'abord une problématique industrielle de connaissance de cette pérennité, de développement d'une méthodologie et d'un outil d'évaluation des profils multi-performances des produits de construction et d'utilisation de cette connaissance. Cette étude concerne l'ensemble des acteurs de la construction liés à la conception, l'évaluation, la mise en œuvre, le contrôle et le suivi en exploitation de ces produits.
En effet, un ouvrage est une combinaison de « matières » – matériaux, produits de construction et équipements – de « méthodes » – savoir-faire, réglementation – d'« ingénierie » et de « matériels ». Tout au long de son cycle de vie, de sa conception à sa déconstruction en passant par sa mise en œuvre, son exploitation, son inspection / maintenance / réparation, sa réhabilitation, un ouvrage se trouve dans un environnement climatique et d'usage aléatoire.

L'étude de la pérennité de la performance dans le temps d'un produit de construction met en jeu des thématiques de recherche académiques. Il s'agit d'appréhender le comportement fonctionnel des produits à partir des scénarii de dégradation, par une modélisation systémique et multi-échelles, de capitaliser et d'utiliser des données multi-sources, d'évaluer la criticité des scénarii, et d'intégrer une approche multicritère, toutes ces notions devant intégrer le phénomène temps.
D'une part, ces problématiques académiques renvoient à un ensemble de méthodes, de méthodologies et d'outils scientifiques existants, se rapportant à l'analyse des dysfonctionnements, l'analyse de la criticité, l'évaluation de la durée de vie, l'évaluation de la performance. D'autre part, ces problématiques doivent traiter des différentes échelles d'étude associées :

- échelle géométrique : il est possible d'étudier l'ouvrage dans sa globalité, au niveau de ses produits, de ses composants ou de ses matériaux,
- échelle phénoménologique : l'étude des mécanismes de dégradation peut être réalisée au niveau du phénomène, du scénario ou des scénarii de dégradation,

- échelle fonctionnelle : il est possible de s'intéresser à une fonction particulière ou à l'ensemble des fonctions et de leur combinaison,
- échelle temporelle : les recherches peuvent se focaliser sur la phase de conception, ou celle de mise en œuvre, ou celle d'exploitation ou celle d'inspection maintenance réparation.



Dans ce double contexte industriel et académique, nous défendons la thèse qu'une approche méthodologique d'évaluation des performances des produits de construction dans le temps est possible. Cette méthodologie doit permettre de « naviguer » à différents niveaux sur les composantes de l'approche multi-échelle : géométrique, phénoménologique, fonctionnelle et temporelle.

Afin d'exposer le cadre général de cette thèse ainsi que les pré-requis essentiels à sa compréhension, nous présentons dans la partie A, le double contexte académique et industriel ainsi que les méthodes, méthodologies et outils existants permettant d'apporter des réponses à cette dernière.
La partie B présente la réponse que nous apportons. Nous introduisons dans un premier temps les méthodes, bases de données et outils de représentation puis dans un deuxième temps la méthodologie proposée d'évaluation du profil multi-performance des produits de construction dans le temps.
Nous présentons en partie C, les applications de cette méthodologie à des produits de construction, son analyse critique ainsi que les développements industriels en cours et envisagés.

Partie A

Réponses existantes à la problématique d'évaluation de la durée de vie et de la performance

Introduction aux réponses existantes

Chapitre I : Problématique générale de la thèse

Chapitre II : Etat de l'art des recherches, méthodes et outils existants

Synthèse : problématique choisie

Introduction aux réponses existantes

Ce mémoire de thèse est l'aboutissement d'un travail de recherches mené conjointement avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) – département Développement Durable, division Environnement, Produits et Ouvrages Durables – et le Laboratoire Génie Civil. La problématique développée ici s'inscrit donc dans les thématiques de recherches communes à ces deux organismes.

Cette première partie consacrée aux réponses existantes à la problématique d'évaluation de la durée de vie des produits de construction et d'évaluation de leur performance dans le temps s'articule autour de trois items :

- présentation de la problématique générale – industrielle et académique – de la thèse (*cf.* chapitre I),
- état de l'art des recherches, méthodes et outils existants sur l'analyse des dysfonctionnements, l'analyse de la criticité des scénarii, l'évaluation de la durée de vie et l'évaluation de la performance fonctionnelle des produits de construction (*cf.* chapitre II),
- énoncé de la problématique développée dans ce mémoire de thèse (*cf.* synthèse).

Chapitre I : Problématique générale de la thèse

I.1. Problématique industrielle

La problématique industrielle est de connaître l'évolution de la performance dans le temps de tout produit de construction en service – en utilisant les connaissances des mécanismes de dégradation, affectant cette performance, acquises au niveau des matériaux, des produits et du bâtiment – et de développer un outil méthodologique d'évaluation de cette performance, afin de pouvoir aider à la conception et à l'inspection – maintenance – réparation de ces produits.
La performance d'un produit de construction caractérise son fonctionnement ; elle est définie par le comportement global des fonctions requises pour ce produit. Cette performance est étudiée pour la durée de vie du produit, c'est-à-dire de sa mise en service jusqu'à sa défaillance.

La durée de vie et la performance d'un produit sont liées et leur estimation suscite l'intérêt d'organismes nationaux et internationaux ; c'est pourquoi le premier paragraphe détaille les définitions de ces deux notions, telles que proposées par ces organismes (*cf.* I.1.1), avant de développer la problématique industrielle ; celle-ci est décomposée ici en deux thèmes :

1. connaissance de l'évolution de la performance des produits (*cf.* I.1.2),
2. développement d'un outil méthodologique d'évaluation de la performance (*cf.* I.1.3).

I.1.1. Terminologie de la durée de vie et de la performance

Durée de vie

Le concept de durée de vie dans le domaine de la construction est véhiculé depuis 1978 à travers des réglementations, des groupes de travail et des conférences nationales et internationales ; nous retenons principalement :

Réglementations :

- 1978 : norme américaine ASTM E 632-82 du sous-comité E06.22 de l'American Society for Testing and Materials [AST, 78],
- 1988 : norme française NF X 60-500 [AFN, 88],
- 1992 : norme britannique BS 7543 [BSI, 92],
- 1993 : version anglaise du guide japonais de l'Architectural Institute of Japan [AIJ, 93],
- depuis 1993 : la norme internationale ISO 15686 de l'ISO/TC59/SC14 [ISO, 05],
- 1995 : guide canadien CSA S478-95 de la Canadian Standards Association [CSA, 95],

Groupes de travail :

- CIB : groupes de travail internationaux s'intéressant aux thématiques « Service Life Prediction of Building Materials and Components » (W080), « Building Pathology » (W086), « Design for Durability » (W094) et « Life Time Engineering in Construction » (W105),
- Rilem : Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Constructions et Ouvrages,

Conférences :

- 1978 à 2005 : dix conférences internationales « Durability of Building Materials and Components »,
- 1995 à 2004 : quatre conférences internationales « CIB World Building Congress ».

Nous retenons comme définition de la **durée de vie** (service life) celle de l'ISO 15686-1 qui est la plus récente et qui représente un consensus international. La durée de vie y est définie comme « le laps de temps après mise en œuvre pendant lequel un bâtiment ou des composants de bâtiment atteint ou dépasse les *exigences de performance* ».

Remarques : une *exigence de performance* correspond, selon l'ISO 15686-1, au « niveau minimum acceptable d'une *propriété critique* » et une *propriété critique* exprime « une propriété d'un bâtiment ou des composants de bâtiment qui a une valeur acceptable si ses fonctions requises sont assurées ».
Les termes « produit de construction » et « composants de bâtiment » sont ici équivalents.

La durée de vie d'un produit est utilisée en conception (*durée de vie de conception*, *durée de vie de référence*, *durée de vie estimée*) ou en inspection – maintenance – réparation (*durée de vie résiduelle*) afin de prévoir la **durée de vie réelle**, c'est-à-dire le laps de temps de service en conditions réelles, de ce produit.

Ces durées de vie sont définies dans l'ISO 15686-1 comme suit :

- **durée de vie de conception** (design life) : « durée de vie recherchée par le concepteur », par exemple la durée de vie de conception du viaduc de Millau est fixée à 120 ans,
- **durée de vie de référence** (reference service life) : « durée de vie prévue d'un produit/composant/assemblage/système pour un ensemble particulier, c'est-à-dire de référence, de conditions de service et qui peut être la base de l'estimation d'une durée de vie sous d'autres conditions de service », par exemple la durée de vie d'une fenêtre obtenue par un test de vieillissement accéléré sous conditions contrôlées,
- **durée de vie estimée** (estimated service life) : « durée de vie prévue d'un bâtiment ou des composants de bâtiment pour un ensemble de conditions de service spécifique, déterminée à partir de données de durée de vie de référence en prenant en compte les différences de conditions de service », par exemple l'estimation de la durée de vie d'une fenêtre sous des conditions différentes à partir de la durée de vie de référence précédente,
- **durée de vie résiduelle** (residual service life) : « durée de vie restante à partir du moment considéré », par exemple si l'on considère un instant *t* égal à 20 ans et que la durée de vie estimée est égale à 35 ans, alors la durée de vie résiduelle est de 15 ans.

Remarque : nous nous intéressons dans la suite de ce mémoire à l'évaluation de la durée de vie de référence (*cf.* II.3).

Performance

D'après la définition de la durée de vie proposée par l'ISO 15686 [ISO, 05a], les concepts de durée de vie et de performance sont liés ; ce deuxième concept a lui aussi évolué au cours du temps, nous retenons les trois principales définitions de la performance suivantes :

- rapport CIB n°32 : « le mot « performance » (comportement en service) a été choisi pour caractériser le fait qu'un produit doit présenter certaines propriétés qui lui permettent de remplir son rôle lorsqu'il est soumis à certaines *actions* » [CIB, 75],
- ISO 6241 : « comportement (d'un produit) en relation avec son usage » [ISO, 84], il y est spécifié qu'un « produit peut signifier un bâtiment dans son ensemble ou un composant de bâtiment »,
- ISO 15686 : « niveau qualitatif d'une *propriété critique* à tout instant considéré ».

Remarque : les *actions* dans le rapport CIB n°32 sont comprises « au sens large du mot (agents, charges, déformations imposées), dues à des phénomènes d'origine naturelle, artificielle ou humaine se produisant dans leur milieu (environnement, ambiance), comme le feu, le vent, l'humidité, les chocs ou les actions provenant d'autres parties de la construction et qui peuvent être appelées dans leur ensemble influences du milieu ou conditions données ».

Nous préférons les définitions du rapport CIB n°32 et de l'ISO 6241 à celle de l'ISO 15686 en ce sens que la performance n'est pas un « niveau », c'est son évaluation par un ensemble de *critères de performance* qui peut prendre différentes valeurs. De plus, cette évaluation peut être qualitative et / ou quantitative. La **performance d'un produit** est donc, pour nous, une représentation de son comportement fonctionnel global en service.

La terminologie que nous associons à ce concept de performance est la suivante :

- **niveau de performance d'un produit** : valeur numérique et / ou littérale résultant d'une combinaison de niveaux des critères de performance de ce produit,
- **seuil de défaillance d'un produit** : valeur particulière de la performance du produit pour laquelle au moins une ou une combinaison de ses fonctions requises (attendues par les utilisateurs) n'est plus assurée,
- **critère de performance** : mesure permettant d'évaluer une performance ; il est associé à une ou une combinaison de fonction(s) requise(s) d'un produit. Par exemple, la performance d'un mur peut être évaluée à l'aide du coefficient de sécurité au renversement,
- **niveau d'un critère de performance** : valeur numérique et / ou littérale particulière prise par un critère de performance,
- **seuil de dysfonctionnement d'un critère de performance** : valeur particulière de ce critère pour laquelle la ou la combinaison de fonction(s) associée n'est plus assurée,
- **profil multi-performance d'un produit** : représentation normalisée de l'ensemble des niveaux des critères de performance d'un produit à un instant donné.

Représentation des liens entre durée de vie et performance

La durée de vie réelle d'un produit est le laps de temps entre sa mise en service et le moment où son niveau de performance devient inférieur à un seuil de défaillance, noté $\mu_{déf}$. Pour employer un registre moins dépréciateur que la terminologie de l'analyse des défaillances, nous introduisons la notion de « qualité » d'un produit. Un produit est de qualité lorsqu'il est conforme aux attentes des utilisateurs, c'est-à-dire lorsque le niveau de performance de ce produit est au dessus de son seuil de défaillance et que sa défaillance a lieu après la durée de vie souhaitée par l'utilisateur. Dans une démarche de conception, illustrée à la figure 1, l'optimisation de la qualité d'un produit revient, d'une part, à minimiser la distance entre son niveau de performance moyen et son seuil de défaillance, et d'autre part, à minimiser la distance entre sa durée de vie de référence et sa durée de vie réelle.

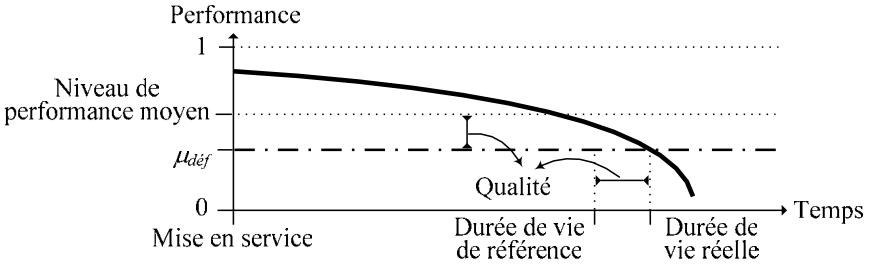


Figure 1 : Représentation des notions de performance et de durées de vie

I.1.2. Connaissance de l'évolution de la performance des produits

Contexte de la construction

Le domaine de la construction se caractérise par de nombreux intervenants organisés autour de multiples entités constructives dans un environnement aléatoire, possédant différentes fonctions et considérées à plusieurs phases de leur cycle de vie.

Intervenants multiples
Les intervenants du domaine de la construction peuvent être regroupés en six catégories [DES, 96], [ARM, 99] : les destinataires (maître d'ouvrage, occupants,…), les concepteurs / l'ingénierie (maître d'œuvre, techniciens spécialisés,…), les exécuteurs (entrepreneurs de tous les corps d'état,…), les contrôleurs (contrôleurs techniques,…), les service publics (voirie, eau, gaz, électricité,…) et les chercheurs (centres techniques et laboratoires de recherches,…).
Ayant des rôles différents et intervenant sur une ou plusieurs phases du cycle de vie des entités constructives, leurs intérêts sont plus ou moins divergeants. Nous considérons que les intérêts de chacun peuvent être traduits en terme de performance ; dans ce contexte, une entité constructive devra alors satisfaire au mieux à un ensemble de critères de performance.

Entités constructives multiples
Une entité constructive est soit un matériau (par exemple du PVC), soit un composant (par exemple un cadre de fenêtre), soit un produit de construction (par exemple une fenêtre), soit un bâtiment (par exemple un immeuble d'habitation). La diversité des entités constructives implique, d'une part, de multiples comportements dans le temps, méthodes de dimensionnement et techniques de mises en œuvre, d'autre part, une complexité d'assemblage de ces entités constructives et enfin, une unicité d'un point de vue systémique (entité considérée dans son environnement en service).

Différentes fonctions
Les entités constructives présentent à la fois des fonctions (ce pour quoi l'entité constructive a été conçue) communes et à la fois des fonctions propres à chacune d'elles, par exemple un mur porteur et une fenêtre doivent tous les deux résister mécaniquement aux actions des agents environnementaux et seule la fenêtre devra éventuellement pouvoir s'ouvrir.

Environnement aléatoire
Une entité constructive est soumise à un environnement aléatoire : concentration des agents environnementaux dans l'atmosphère, sollicitations « accidentelles » (incendie, inondation,..), sollicitations exceptionnelles, sollicitations cycliques et de fatigue,…

Différentes phases
Les intervenants et la nature de leur intervention sur une entité constructive seront différents selon l'instant du cycle de vie considéré (conception, mise en œuvre, exploitation, réhabilitation, déconstruction) ; par conséquent les informations utiles et capitalisables à chacune de ces phases pourront être différentes.

Activités du CSTB dans cette thématique

Niveau matériau
L'évaluation de la durabilité concerne l'ensemble des matériaux de construction (essais de vieillissement, essais mécaniques, essais physico-chimiques, essais thermiques). Le CSTB détient ainsi une expertise importante des mécanismes de dégradations affectant les principaux matériaux de construction.

Niveau produit

Le CSTB évalue la durabilité des produits de construction (plateforme de données de durée de vie, logiciel EDIFICE, norme ISO 15686-8,…) mais sans intégrer la connaissance des dégradations affectant ces produits. Un autre aspect de leur activité concerne l'évaluation de l'impact des produits sur l'environnement et la santé (base de données INIES,…) et leur certification (avis techniques, ACERMI, UPEC, marquage CE,…). Ce second type d'approches prend en compte la durée de vie de conception.

Niveau bâtiment

A ce niveau, il s'agit de l'évaluation de l'impact des bâtiments sur l'environnement et la santé (NF bâtiments tertiaires – Démarche HQE®,…), l'évaluation en coût global et l'aide à la maintenance des bâtiments, qui prennent en compte la durée de vie de conception et non celle en service.

I.1.3. Développement d'un outil méthodologique d'évaluation de la performance

La problématique industrielle consiste à pouvoir utiliser la connaissance acquise de durées de vie de référence des produits de construction associées aux profils multi-performances dans le cadre, d'une part, de l'aide à la conception, et d'autre part, de l'aide à l'inspection – maintenance – réparation de ces produits. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une méthodologie d'évaluation qui soit applicable à l'ensemble de ces produits.
La mise en œuvre opérationnelle de cette méthodologie requiert le développement d'un outil de capitalisation des données – fonctionnelles, environnementales, phénoménologiques, temporelles, etc. – et d'obtention du profil multi-performance.
Cette mise en œuvre passe par une informatisation de cette méthodologie. L'intérêt de développer un outil permettant également de capitaliser les informations recueillies et générées lors d'une étude spécifique est :

- d'utiliser ces informations et donc d'accélérer la réalisation d'autres études,
- de conserver sous une forme exploitable les connaissances expertes acquises au fur et à mesure du temps et des projets menés.

I.2. Problématique académique

La problématique industrielle présentée ci-dessus met en jeu plusieurs thématiques de recherches académiques.
L'évaluation du profil multi-performance d'un produit de construction nécessite la connaissance de son comportement, c'est-à-dire de ses modes de fonctionnement / dysfonctionnement. Ce comportement est affecté par des modes de dégradation, qui s'enchaînent pour conduire selon différents scénarii à la défaillance du produit (première thématique – *cf.* I.2.1).
L'étude de la performance d'un produit en service, à partir de la connaissance des mécanismes de dégradation des matériaux, requiert une modélisation systémique (produit considéré dans son environnement) et multi-échelle puisque cette étude intègre à la fois plusieurs niveaux d'entités constructives (matériau, composant, produit), les phénomènes de dégradation, les fonctions de ce produit et le temps (deuxième thématique – *cf.* I.2.2).
L'évaluation d'un profil multi-performance implique la capitalisation et l'utilisation de données multi-sources et multi-échelles, et met donc en jeu des méthodes d'évaluation de la qualité des données, d'unification et d'agrégation (troisième thématique – *cf.* I.2.3).

La modélisation sous forme de scénarii en interactions – lors de l'étude du comportement d'un produit – et la recherche des scénarii les plus critiques sont liées à la théorie des graphes, à leur probabilisation et à la recherche du chemin critique (quatrième thématique – *cf.* I.2.4).

I.2.1. Connaissance du comportement d'un produit à l'aide de scénarii

La problématique académique consiste ici à modéliser la connaissance du comportement d'un produit sous forme d'enchaînements de phénomènes (caractérisés par leur mode de dégradation, leurs causes, leurs conséquences et les composants qu'ils affectent), c'est-à-dire les scénarii de dégradation, qui conduisent à la défaillance du produit.
Notre approche se distingue alors des recherches menées jusqu'alors vis-à-vis du comportement des entités constructives :

- **niveau matériau** : étude des principaux mécanismes de dégradation affectant les propriétés mécano-physico-chimiques des matériaux. Bien que cette connaissance soit très précise, son acquisition nécessite des moyens (en temps, humains et financiers) importants, et elle peut difficilement être interpolée à d'autres paires {matériau ; conditions environnementales} ;
- **niveau produit** : observation de l'existant (retour d'expérience analysé par des experts) pour l'essentiel des recherches. Cette connaissance est moins précise que celle acquise au niveau des matériaux puisque les paramètres influençant ce comportement (conditions climatiques et d'usages) sont mal maîtrisés. Une interpolation à des paires {produit ; conditions de service} autres que celles observées est donc difficile ;
- **niveau bâtiment** : recherche de l'impact du bâtiment sur son environnement climatique (émission de CO_2 par exemple) et son environnement humain (confort et qualité de l'air) plutôt que le comportement global de ce bâtiment soumis aux conditions climatiques et d'usages.

I.2.2. Approche systémique et modélisation multi-échelle

Approche systémique

L'intérêt de l'approche systémique est de modéliser le fonctionnement global d'un produit, c'est-à-dire intégré dans son environnement de service, afin que cette modélisation soit la plus réaliste possible. La modélisation systémique d'un produit vise à connaître d'une part la structure et le fonctionnement de ce produit attendu lors de sa conception, et d'autre part les interactions entre ce produit et son environnement pour pouvoir en déduire son état de dégradation à tout instant de son processus de construction et de sa vie en œuvre.

L'analyse structurelle d'un produit – par détermination et caractérisation des composants de ce produit, de l'environnement climatique et d'usage susceptible de le dégrader, et des liaisons environnement / produit – permet d'identifier les interactions phénoménologiques entre composants et entre l'environnement et le produit.
L'analyse fonctionnelle – par identification des fonctions principales et secondaires du produit et les liaisons composant / fonction – traduit en terme fonctionnel le rôle, attendu par l'utilisateur, que doit remplir un produit. Le modèle fonctionnel du produit qui en résulte permet de suivre l'évolution de son fonctionnement au cours de son processus et de sa vie en œuvre, lorsqu'il subit les sollicitations de son environnement.

Modélisation multi-échelles

Cette approche systémique met en jeu une modélisation multi-échelle, afin d'intégrer les quatre aspects – géométrique, phénoménologique, fonctionnel et temporel – dont dépend notre problématique. En effet, l'évaluation de la performance d'un produit peut intégrer des données variant du niveau du matériau à celui du bâtiment (échelle géométrique). Ces données sont relatives soit à un phénomène, soit à un scénario, soit à l'ensemble des scénarii (échelle phénoménologique). La performance est liée à des critères de performance considérés soit indépendants les uns des autres, soit en interactions (échelle fonctionnelle). Enfin, cette performance peut être évaluée et les données disponibles peuvent être relatives à tout instant du cycle de vie du produit (échelle temporelle).

I.2.3. Capitalisation et utilisation de données multi-sources

Un aspect essentiel de notre problématique consiste à évaluer la qualité des informations provenant de sources multiples ; en effet nous nous intéressons à l'ensemble des produits de construction, ce qui implique l'utilisation et la capitalisation d'une importante somme d'informations générée par plusieurs organismes nationaux et internationaux. Ces informations peuvent être des données phénoménologiques, temporelles et des données liées à l'évaluation des critères de performance de ces produits. L'exactitude des méthodes d'acquisition de ces données, la validité de leur modélisation, la connaissance des conditions environnementales, … doivent être maîtrisées pour pouvoir obtenir des résultats (utilisant ces données) de qualité connue.
Plutôt que de rechercher les données correspondant exactement à nos études, qui ont peu de chance d'être toutes accessibles si elles existent, nous préférons utiliser les méthodes permettant d'exploiter la complémentarité des données disponibles assimilables à nos études (unification des données) ou permettant d'aboutir à l'échelle de nos études (agrégation des données).

I.2.4. Recherche des scénarii critiques

La modélisation du comportement d'un produit soumis à son environnement de service vise à identifier l'ensemble des phénomènes de dégradation pouvant affecter ce produit. Nous cherchons à être exhaustif, pour ne pas oublier de scénarii critiques, puisque ce sont les scénarii critiques qui auront la plus forte influence sur le comportement du produit. Un autre aspect de notre problématique consiste donc à trouver les scénarii les plus critiques en nous basant sur les caractéristiques de leurs phénomènes (durée, probabilité d'apparition) et l'impact de ces scénarii (gravité des conséquences) sur le produit lui-même et son environnement (autres produits, environnement climatique et d'usage).

Chapitre II : Etat de l'art des recherches, méthodes et outils existants

La double problématique présentée précédemment, visant à évaluer la performance d'un produit à tout instant de sa vie en œuvre, se rapporte, selon nous, à quatre thématiques de recherches nationales et internationales.
La première tente d'identifier l'ensemble des phénomènes de dégradation d'un produit à partir d'un modèle fonctionnel ; il s'agit de l'analyse des dysfonctionnements (*cf.* II.1). La seconde thématique, l'analyse de la criticité, cherche à déterminer les scénarii les plus critiques parmi l'ensemble des scénarii obtenus à l'issue d'une analyse des modes de défaillances et de leurs effets – AMDE – (*cf.* II.2). La troisième thématique, correspond à l'évaluation des durées de vie des entités constructives, qui sont des données temporelles essentielles à notre méthodologie (*cf.* II.3). La quatrième thématique se rapporte à l'évaluation de la performance des entités constructives (*cf.* II.4).

L'état de l'art sur les approches, méthodes, méthodologies et outils associés à ces quatre thématiques vise à présenter, d'une part, l'existant et ses lacunes, et d'autre part, les informations utiles à la compréhension des parties B et C de ce mémoire.

II.1. Etat de l'art sur l'analyse des dysfonctionnements

L'analyse des dysfonctionnements est basée sur l'analyse des défaillances qui est définie au sens de la norme NF X 60-500 comme « *l'examen logique et systématique d'une entité après une défaillance en vue d'identifier et d'analyser le mécanisme de défaillance, la cause de défaillances et les conséquences de défaillance* » [AFN, 88].

La théorie de l'analyse des défaillances a été développée dans un contexte industriel, l'adaptation au contexte de la construction requiert un ajustement d'une partie de sa terminologie. En effet, les produits industriels (par analogie avec les produits de construction) sont réalisés en « grande » quantité, la connaissance binaire de leur défaillance ou de leur non défaillance en sortie de chaine de fabrication est par conséquent « suffisante ». Par contre les produits de construction étant uniques d'un point de vue systémique, nous nous intéressons à l'évolution de leur fonctionnement et dysfonctionnement au cours de leur vie en service. Nous distinguons donc trois notions :

- **dégradation (d'une entité constructive)** : c'est une modification des propriétés et / ou de la géométrie de cette entité par rapport à ses propriétés et / ou sa géométrie initiales. Une dégradation est caractérisée par un phénomène et un état de dégradation ;
- **dysfonctionnement (d'une fonction)** : il correspond à un niveau de performance particulier de cette fonction, égal ou inférieur à son seuil de dysfonctionnement ;
- **défaillance (d'une entité constructive)** : une entité constructive est défaillante lorsqu'au moins une ou une combinaison de ses fonctions principales atteint son seuil de défaillance.

Remarque : l'analyse des dysfonctionnements est une approche progressive alors que l'analyse des défaillances est une approche binaire de l'évaluation des niveaux de performance.

L'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE) est la méthode que nous utilisons afin d'identifier l'ensemble des phénomènes puis des scénarii de dégradation d'un produit de construction. Cette méthode issue de la de sûreté de fonctionnement (*cf.* II.1.1), a été développée pour le domaine industriel (*cf.* II.1.2), puis adaptée en France pour le domaine de la construction par J. Lair (*cf.* II.1.3). Les développements que nous présentons en deuxième partie de ce mémoire sont basés sur cette adaptation. L'utilisation par des organismes nationaux et internationaux du domaine de la construction (*cf.* II.1.4) de l'AMDE cautionne son intérêt.

II.1.1. Méthodes de Sûreté de Fonctionnement

Le concept de sûreté de fonctionnement (SdF) a été proposé dans les années 1980 pour définir globalement les performances opérationnelles des systèmes numériques programmés. Ce concept est souvent défini :

a) comme la science des défaillances,
b) à partir des termes *fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité* (FMDS) de l'anglais *reliability, maintenability, availability, safety* (RAMS) [AFN, 88],
c) comme le maintien de la qualité dans le temps.

a) SdF - Science des défaillances

Y. Mortureux [MOR, 05] considère que la définition « science des défaillances » souligne l'importance de la connaissance sur les défaillances (causes, effets, mécanismes…) sans laquelle il n'y a pas d'approche SdF.

b) SdF - Fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité

Les objectifs et activités de base de la sûreté de fonctionnement au sens de la FMDS peuvent être schématisés ainsi :

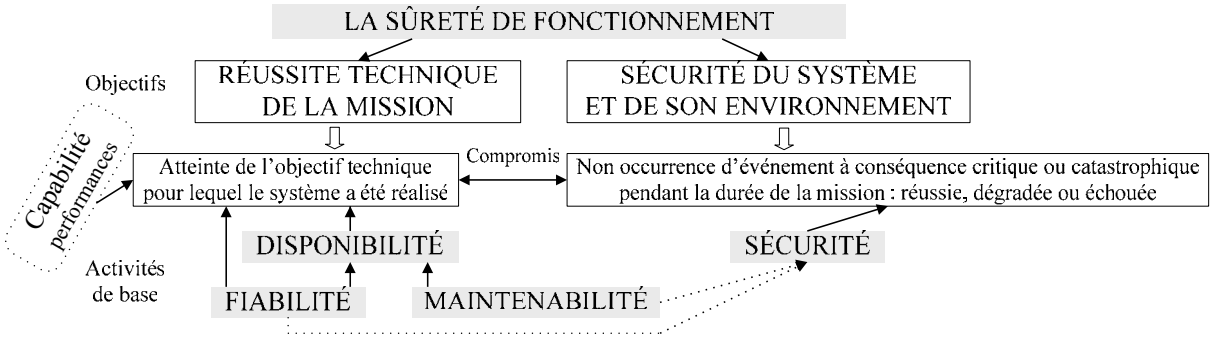


Figure 2 : Activités de FMDS intégrées dans les objectifs de la Sûreté de Fonctionnement [DES, 03]

La FMDS peut être complétée par les deux caractéristiques suivantes :

- la survivabilité : aptitude ou probabilité d'un système à résister à une agression sans souffrir d'une dégradation complète de sa capacité à accomplir sa mission ;
- la vulnérabilité : aptitude ou probabilité d'un système à se dégrader, avec réduction de sa capacité à réaliser sa mission sous l'effet d'une agression de nature et de niveau définis.

c) SdF - Maintien de la qualité dans le temps

La définition « maintien de la qualité dans le temps », selon [MOR, 05] met en évidence quant à elle l'importance de la durée et de la référence à des exigences (explicites ou non).

De nombreuses méthodes de Sûreté de Fonctionnement ont été développées ; elles sont généralement classées selon différentes typologies :

- méthodes *qualitative* ou *quantitative* : « une méthode quantitative permet d'évaluer la probabilité des composantes (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité) de la Sûreté de Fonctionnement » contrairement à une méthode qualitative qui ne vise pas à quantifier cette probabilité [DES, 03],
- méthodes *inductive* ou *déductive* : « les méthodes inductives sont initiées à partir des causes d'une situation à risque pour en déterminer les conséquences » et « les méthodes déductives sont initiées à partir des conséquences d'une situation à risque pour en déterminer leurs causes » [DES, 03],
- méthodes *statique* ou *dynamique* : « une méthode dynamique permet de prendre en compte l'évolution de la configuration des composants du système au cours du temps » contrairement à une méthode statique [DES, 03].

Le tableau 1 est un extrait de l'annexe 1 regroupant les principales méthodes de Sûreté de Fonctionnement et renseigne leur objectif principal, leurs typologies ainsi que leurs principales références.

Nom de la méthode	Objectif principal	Typologies	Références
Méthode de l'Arbre des Défaillances (MAD) ou des Défauts ou des Fautes(1)	Identifier les causes combinées à partir de la définition d'un événement redouté au niveau système.	Quantitative Déductive Statique	[MOR, 05] [IMD, 04] [DES, 03] [INE, 03] [MOR, 02a] [LAI, 00] [PER, 00] [ROL, 98] [HAD, 97] [ZWI, 96] [ZWI, 95] [MOD, 93] [VIL, 88] [PAG, 80] [LEM, 66]
Méthode de l'Arbre des Conséquences ou Arbres d'Evénements (MACQ/MAE)(2)	Décrire les scénarii d'accident à partir d'un événement initiateur.	Quantitative Inductive Statique	[MOR, 05] [IMD, 04] [DES, 03] [INE, 03] [MOR, 02a] [LAI, 00] [ROL, 98] [ZWI, 96] [ZWI, 95] [MOD, 93] [VIL, 88] [LEM, 66]
Analyse Préliminaire des Risques / Dangers (APR/APD)	Identifier les scénarii d'accident en présence de danger.	Qualitative Inductive Statique	[MOR, 05] [DES, 03] [INE, 03] [MOR, 02b] [LAI, 00] [ROL, 98] [HAD, 97] [ZWI, 96] [ZWI, 95]
Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)(3)	Identifier les effets des modes de défaillance des composants sur le niveau système.	Quantitative(4) Inductive Statique	[MOR, 05] [FAU, 04] [IMD, 04] [DES, 03] [INE, 03] [LAS, 01] [LAI, 00] [AFN, 98a] [CET, 98] [ROL, 98] [ZWI, 96] [ZWI, 95] [MOD, 93] [AFN, 86] [IEC, 85] [DEP, 80] [PAG, 80] [LEM, 66] [ISD, 90]
Réseaux de Pétri	Evaluer le comportement dynamique d'un système réparable en présence de pannes.	Quantitative Inductive Dynamique	[MOR, 05] [DES, 03] [LAI, 00] [ROL, 98]
Méthode Nœud Papillon	Visualiser concrètement des scénarii d'accidents qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences au niveau des cibles identifiées.	Quantitative Déductive / Inductive Statique	[INE, 03]

(1) En anglais : Fault Tree Method. L'approche inverse, considérant le fonctionnement à la place de la défaillance, est la Success Tree Method.
(2) En anglais : Event Tree Method.
(3) En anglais : Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA).
(4) L'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE), sans l'analyse de Criticité, est une méthode qualitative.

Tableau 1 : Principales méthodes de Sûreté de Fonctionnement (extrait de l'annexe 1)

II.1.2. Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité

L'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets (et de leur criticité) – AMDE(C) – a été retenue parmi l'ensemble des méthodes d'analyse des défaillances puisqu'elle est, selon J. Lair [LAI, 00] et nous-mêmes, la mieux adaptée à la recherche systématique et la qualification de l'ensemble des phénomènes affectant le fonctionnement des systèmes constructifs (entités constructives considérées dans leur environnement).

1) Historique

L'AMDEC a été mise au point dans les années 1960, outre-Atlantique, pour les domaines de l'armement nucléaire et de l'aéronautique. Cette méthode s'est peu à peu imposée dans les domaines industriels tels que le spatial, la chimie, l'industrie automobile, les centrales nucléaires. C'est actuellement une des méthodes d'analyse des risques (de défaillances) la plus universellement utilisée dans l'industrie.
Elle fait l'objet de normes internationales et nationale [DEP, 80] [IEC, 85] et [AFN, 86] et de référentiels spécifiques à des domaines industriels, tels que ceux développés dans l'industrie automobile par Renault, PSA, Ford,…

2) Démarche et caractéristiques d'une AMDEC

Un pré requis essentiel à la réalisation d'une AMDEC est qu'« il faut bien connaître le fonctionnement du produit qui est analysé ou avoir les moyens de se procurer l'information auprès de ceux qui la détiennent » [ISD, 90]. L'AMDEC commence donc nécessairement par une analyse fonctionnelle ; il s'agit d'une démarche normalisée. L'intégration de l'analyse fonctionnelle et les principales phases d'une démarche AMDEC sont présentées à la figure 3 :

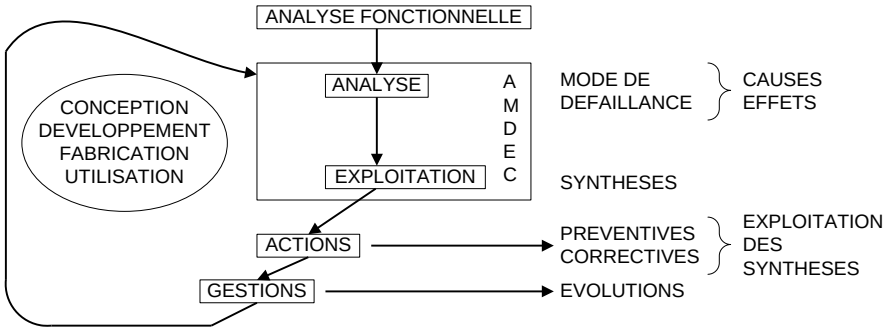


Figure 3 : Principales phases d'une démarche d'AMDEC [ISD, 90]

« L'AMDEC n'est pas une simple grille ou un formulaire à renseigner, mais il s'agit avant tout d'une méthode, c'est-à-dire une démarche ordonnée et raisonnée, une façon de penser, développée par rapport à un objectif précis … identifier les modes de défaillance potentiels et traiter ces défaillances avant qu'elles ne surviennent, en vue de les éliminer ou d'en minimiser les conséquences. » [FAU, 04]. Les principales caractéristiques de cette méthode sont les suivantes :

- elle analyse *la fiabilité du système* : la façon dont il assure (ou non) les fonctions pour lesquelles il a été conçu ;
- il s'agit d'une *analyse exhaustive*, de par sa démarche très systématique permettant de lister tous les composants du système, identifier les différents modes de défaillance qui peuvent les affecter et les conséquences sur le système, l'environnement, les personnes ;

- il s'agit d'une *méthode analytique* : l'étude du système s'obtient par l'étude de ses composants et de leurs interactions ;
- il s'agit d'une *démarche inductive* : partant de l'identification des défaillances qui peuvent affecter un composant du système considéré dans un environnement, elle amène à identifier l'effet de ces défaillances sur le système ;
- il s'agit d'une analyse uniquement *qualitative* pour l'AMDE. C'est l'analyse de criticité qui adjoint l'aspect quantitatif à la méthode.

3) Formats d'une AMDEC

Il est souvent fait référence à des tableaux ou des grilles AMDEC. Il s'agit, en fait, de formaliser dans des tableaux à colonnes la réflexion menée. Il n'existe pas de tableaux standard, il serait en effet peu judicieux d'utiliser indifféremment la même grille dans tous les domaines industriels.
Néanmoins, les tableaux AMDEC contiennent généralement, selon [AFN, 86] [ZWI, 95] [ISD, 90] et [FAU, 04], les colonnes suivantes :

- le nom de l'élément du système analysé,
- la fonction remplie par l'élément,
- les modes de défaillance,
- les causes de défaillance,
- les effets de défaillance,
- des remarques ou observations,

auxquelles peuvent s'ajouter :

- le repère d'identification de l'élément,
- la phase de vie, le mode de fonctionnement,
- la probabilité d'apparition de la défaillance,
- les méthodes et moyens de détection des défaillances,
- la gravité / un jugement qualitatif sur l'importance de la défaillance,
- la criticité de la défaillance,
- le suivi / la testabilité / la validation / la vérification,
- les actions correctives / les solutions de remplacement prévues.

Dans le domaine industriel, on distingue huit types d'AMDE(C) : AMDE(C) produit, AMDE(C) process ou procédé, AMDE(C) machine, AMDE(C) montage, AMDE(C) contrôle, AMDE(C) service et AMDE(C) prestation de service ; leur objectif et contenu sont détaillés en annexe 2.

II.1.3. Adaptation de l'AMDE au domaine de la construction

L'adaptation de cette méthode au domaine de la construction, proposée par J. Lair [LAI, 00], réside, d'une part, dans l'inversion de l'ordre de réalisation des AMDE processus et produit, et d'autre part, dans la prise en compte du caractère complexe (enchaînement de dégradations) de la défaillance d'un système.

La comparaison des approches des deux domaines (industriel et de la construction) est schématisée à la figure 4, puis détaillée ci-après.

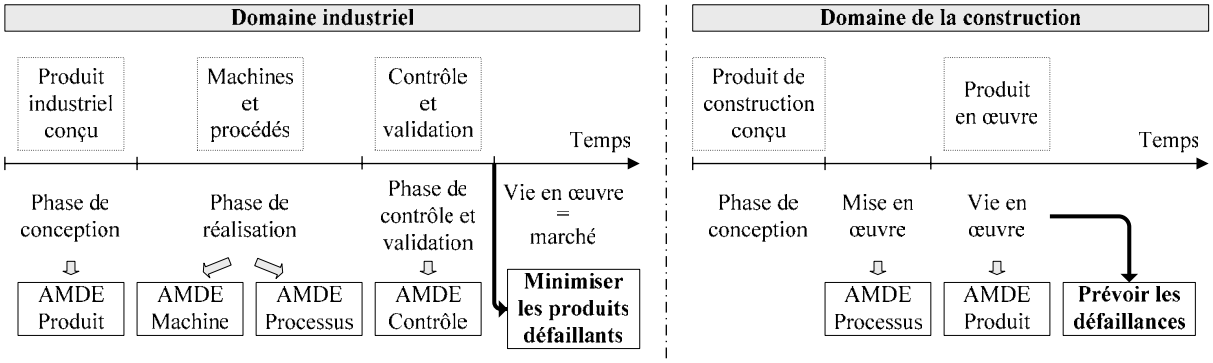


Figure 4 : Comparaison des approches AMDE du domaine industriel et du domaine de la construction

Les AMDE du domaine industriel se distinguent des AMDE du domaine de la construction, du fait que les résultats attendus par ces analyses sont divergents.
Dans le domaine industriel, les AMDE visent à réduire les défaillances des systèmes industriels qui seront mis sur le marché. Par conséquent, les AMDE réalisées (AMDE conception, AMDE machine, AMDE processus, AMDE contrôle) permettent d'améliorer les différentes phases de production des systèmes industriels.
L'objectif des AMDE pour le domaine de la construction est de réduire les défaillances des systèmes constructifs lors de leur vie en œuvre. Ces défaillances pouvant être dues à la phase de conception, à la phase de mise en œuvre et aux sollicitations climatiques et d'usage du produit. J. Lair a donc proposé d'identifier les défaillances potentielles des systèmes constructifs par une AMDE processus de la phase de mise en œuvre suivie d'une AMDE produit lors de sa vie en œuvre.

Dans le domaine industriel, seules les défaillances « élémentaires », c'est-à-dire celles dues à des causes élémentaires, sont prises en compte lors de la réalisation d'une AMDE. L'un des apports de J. Lair a consisté à rendre compte du caractère complexe des défaillances, dues à une succession de causes.
Il distingue trois origines possibles aux dégradations :

- les problèmes de conception ou de mise en œuvre des composants,
- les problèmes de sollicitations climatiques et humaines,
- les problèmes de sollicitations par d'autres composants.

II.1.4. Applications nationales et internationales de l'AMDE dans le domaine de la construction

Nos apports et applications

Nos apports concernant l'AMDE seront présentés en parties B et C de ce mémoire.
En terme applicatif, nous avons réalisé l'AMDE de capteurs solaires et de doubles vitrages dans le cadre d'une convention nationale et de projets internationaux :

- convention ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) : Durabilité et fiabilité des capteurs solaires [LAI, 03a],
- projet international SWIFT (Switchable Facade Technology) Workpackage 2 : Durability and Reliability [PLA, 03],
- projet international IEA (International Energy Agency) Task 27 Project C2 : Failure Mode Analysis [LAI, 03b] [TAL, 03a].

Approches des centres de recherche nationaux et internationaux

L'AMDE et l'AMDEC suscitent l'intérêt de plusieurs centres de recherche nationaux et internationaux du domaine de la construction ; elles sont très souvent intégrées dans une approche plus globale. L'état de l'art de ces approches a fait l'objet d'un rapport pour le CIB W80 « Service Life Methodologies – Prediction of Service Life for Buildings and Components » [TAL, 06] en vue d'encourager l'application de cette méthode dans le domaine de la construction. Les démarches adoptées par ces organismes de recherches sont succinctement présentées dans ce paragraphe.

1) Aspen Research Corporation, Pando Technologies (Etats-Unis), R. Hage, J.E. Fairman, [CUR, 05] [ASP, 02]

Leur démarche est basée sur la réalisation d'une AMDEC afin d'interpréter qualitativement et quantitativement les mécanismes de dégradations. Cette base de connaissance des modes de défaillances les plus critiques leur permet de proposer des modèles de comportement et les caractéristiques des tests de vieillissement accélérés à réaliser pour valider ces modèles. Elle s'inscrit dans une volonté d'évaluation de la durabilité des doubles vitrages. Cette étude correspond à un projet du Department of Energy, intitulé « An insulating Glass Knowledge ».

2) Building Research Establishment (Royaume Uni), E.V. Bartlett, M.R. Clift, [BAR, 99]

L'AMDEC s'intègre dans une démarche globale d'amélioration de la chaîne d'approvisionnement des bâtiments durant tout leur cycle de vie. Dans ce contexte, l'AMDEC est utilisée comme méthode d'identification des défaillances du processus d'approvisionnement les plus critiques. Ainsi elle permet d'alimenter la « Reliability Centred Maintenance » qui permet d'optimiser la fiabilité de ce processus. Cette dernière aboutit à la description des corrections ou modifications à apporter, soit en phase de gestion, soit en phase de conception.

3) Centre for Window and Cladding Technology, University of Bath (Royaume Uni), J. Layzell, S. Ledbetter, [LAY, 98]

Dans le cadre d'un projet mené avec des fabricants de bardages, ce centre de recherche a appliqué l'AMDEC, afin d'étudier les défaillances des bardages à l'échelle du composant, du système et du processus de construction. L'objectif est d'améliorer la qualité des bardages lors de leur conception et de faciliter les interventions d'inspection et de surveillance sur les chantiers.

4) SP Swedish National Testing and Research Institute (Suède), Bo. Carlsson, K. Möller, [CAR, 02]

Cet institut de recherche applique une méthode proche de l'AMDE, l'Initial Risk Analysis (IRA), afin de déterminer les modes de défaillance possibles de capteurs solaires spécifiques. L'objectif est de définir qualitativement les paramètres qui influencent la durabilité de ces produits. Ces paramètres sont ensuite étudiés en réalisant des tests de vieillissement. La proposition de modèles mathématiques et leurs corrélations avec les résultats expérimentaux permettent d'évaluer la durée de vie de ces capteurs solaires. Cette étude a été proposée dans le cadre d'un projet international intitulé « Durability assessment methodology development » (Internation Energy Agency Task 27 Project B1).

5) Politecnico di Torino (Italie), R. Pollo, [POL, 03]

Son approche consiste à combiner trois méthodes – l'AMDE, la « Life Cycle Cost » et la « Maintenance Cost Planning » – afin d'améliorer les produits de construction en phase de conception. Il s'agit de prévoir leurs taux de dégradation en considérant leurs conditions d'utilisation, d'améliorer leurs maintenances et d'optimiser leur coût global durant leur vie en œuvre.

6) Technical Consultant (Royaume Uni), D. Wyatt, [WYA, 05]

L'approche proposée par D. Wyatt consiste à intégrer l'AMDE et la méthode de l'arbre des défauts dans les procédures de contrôle et d'audit des performances des bâtiments. L'AMDE est menée afin d'identifier les erreurs commises lors de leur phase de conception.

7) Cemagref (France), Laurent Peyras, [PEY, 02]

L'AMDE est intégrée dans une méthode originale d'aide à la gestion des barrages. L. Peyras combine une base de connaissances des mécanismes de vieillissement d'ouvrages et une base de données d'historiques de vieillissement, afin de faciliter le diagnostic de l'ouvrage étudié. Il mène ensuite une analyse du risque lié à cet ouvrage afin de déterminer les travaux à entreprendre. La base de connaissances et la base de données sont respectivement construites à partir du recueil d'expertise et du retour d'expérience.
Dans ce contexte, l'AMDE permet la réalisation de la base de connaissances en structurant les données d'expertises relatives au vieillissement des barrages et en établissant les liens de cause à effet et les séquences de dégradation.

II.1.5. Synthèse et analyse critique

De nombreuses méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement permettent d'analyser de manière inductive ou déductive, qualitative ou quantitative, statique ou dynamique les défaillances des systèmes.
Parmi elles, l'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), de par son apparente simplicité d'application, séduit et est souvent utilisée dans le domaine industriel. Mais, de même que l'habit ne fait pas le moine, l'entête de l'AMDEC ne fait pas l'exhaustivité de ses résultats. En effet, seuls les moyens mis en œuvre pour identifier tous les composants et tous les modes de défaillance la « garantiront ». D'autre part, ces résultats ne représentent que l'état de connaissance du système étudié, à un moment donné.
La pertinence des résultats d'une AMDEC est assujettie à la connaissance structurelle et fonctionnelle du système qui est étudié. C'est pourquoi J. Lair, dans son adaptation de l'AMDE aux systèmes constructifs, a défini une démarche d'analyse structurelle et d'analyses fonctionnelles de ces systèmes. L'étape d'AMDE elle-même, se décompose en une AMDE processus (phase de mise en œuvre) suivie d'une AMDE produit (phase de vie en œuvre).
Dans le domaine de la construction, l'AMDE(C) suscite un intérêt grandissant, comme en témoigne son application par des organismes de recherches et dans des projets nationaux et internationaux.
On peut néanmoins retenir les principaux avantages et limites de l'AMDEC suivants :

- la démarche AMDEC permet 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,
- l'exhaustivité des résultats est liée à une démarche systématique d'identification des défaillances et ne sera au mieux qu'un reflet de l'état de connaissance, à un moment donné, du fonctionnement et des défaillance d'un produit,

- la qualité des résultats est assujettie à la connaissance structurelle et fonctionnelle du système étudié,
- la réalisation d'une AMDE(C) présente une certaine lourdeur et est couteuse en temps,
- dans le domaine de la construction, cette méthode est utilisée au cas par cas. Il n'existe donc pas de démarche systématique de réalisation d'une AMDE ni une volonté de réutilisation des résultats obtenus pour un système constructif particulier pour l'étude d'un autre système. Ceci peut s'expliquer par le fait que les conséquences de la défaillance des produits de construction sont plus difficilement quantifiables financièrement que celles de la défaillance d'un produit industriel,
- les phénomènes combinatoires ou dynamiques sont difficiles à prendre en compte ; d'autres méthodes (arbre des défaillances, méthode de combinaison de panne, …) sont mieux adaptées,
- seule la notion binaire de la défaillance est prise en compte (ou est explicite) dans les approches présentées.

II.2. Etat de l'art sur l'analyse de la criticité

La criticité est l'analyse quantitative qui suit une analyse des modes de défaillances et de leurs effets, le C d'une AMDEC ; cette analyse est décrite par J. Faucher [FAU, 04], comme : « L'évaluation de la criticité a pour but de hiérarchiser les modes de défaillance des composants d'un système ou d'établir une liste de ceux considérés comme critiques, afin de les traiter de façon préventive. Pour cela, on utilise un système de cotation ou de notation, constitué par des critères sur lesquels on jugera les modes de défaillance, des échelles d'évaluation et une méthode d'agrégation des jugements relatif à chacun des critères ».

L'analyse de la criticité est une méthode issue de l'analyse des risques (*cf.* II.2.1), mais si la criticité peut parfois être confondue, selon sa formulation, avec le risque dans le domaine industriel, il est incorrect de considérer cette similitude dans le domaine de la construction (*cf.* II.2.2).
Le risque est généralement défini quantitativement par trois paramètres {scénario conduisant à un événement indésirable ; l'occurrence de ce scénario ; les conséquences de ce scénario} (*cf.* II.2.1) et la criticité, dans le domaine industriel, correspond le plus souvent au produit de l'occurrence d'une défaillance, par la gravité des conséquences de cette défaillance et par la détectabilité de cette défaillance (*cf.* II.2.3).
Cette formulation de la criticité ne nous semble pas adaptée, au domaine de la construction, et nous préférons considérer la criticité d'un scénario comme une combinaison de trois paramètres {probabilité d'apparition du scénario ; durée de ce scénario ; gravité des conséquences de ce scénario} (*cf.* II.2.4).

II.2.1. Concepts du risque

Nous détaillons les concepts du risque, d'une part, pour connaître le contexte dans lequel l'analyse de la criticité a été formulée (puisque l'analyse de la criticité est une méthode d'analyse des risques, dans le domaine industriel), et d'autre part, pour bien identifier les différences entre criticité et risque.

Définitions du risque

Le tableau 2 regroupe les principales définitions du risque proposées dans des normes françaises (NF F 71-011 et RE.Aéro 701 10), européennes (EN 292-1, prEN 50 126, prEN 50 128, prEN 50 129), internationale (CEI 56 sec 410) et des ouvrages relatifs à l'analyse des risques.

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}.*

Tableau 2 : Définitions du risque

Remarque : les définitions des notions associées au risque – danger, accident, défaillance, dommage – sont détaillées dans [HAD, 97].

La définition du risque que nous retenons correspond à la onzième référence du tableau 2.

Mise à part la terminologie spécifique à chaque domaine, ces définitions se recoupent : le risque correspond donc à la quantification d'un événement (danger / accident / lésion / défaillance) par son occurrence / fréquence et la gravité de ses conséquences.

L'objectif de l'évaluation du risque d'un événement est de juger de son acceptabilité et dans le cas d'inacceptabilité de prendre des mesures de prévention ou de protection.

Risque acceptable

Le risque acceptable est le risque qui est toléré par la majorité d'une population ; il s'agit généralement d'un compromis entre risque encouru et coût, résultant d'une démarche de prise de décision en cinq étapes [FIS, 81] :

- spécifier les objectifs du système à atteindre,
- définir les solutions possibles vis-à-vis des objectifs attendus,
- identifier les conséquences possibles de chaque solution,
- spécifier la gravité de chacune des conséquences,
- analyser les différentes solutions et sélectionner la meilleure.

Les domaines du risque acceptable et du risque inacceptable sont classiquement représentés par le diagramme de Farmer (figure 5), où l'on constate qu'il existe deux manières permettant de passer du domaine du risque inacceptable à celui du risque acceptable : la prévention (réduction de la fréquence / occurrence) et la protection (réduction de la gravité des conséquences) [MOR, 05].

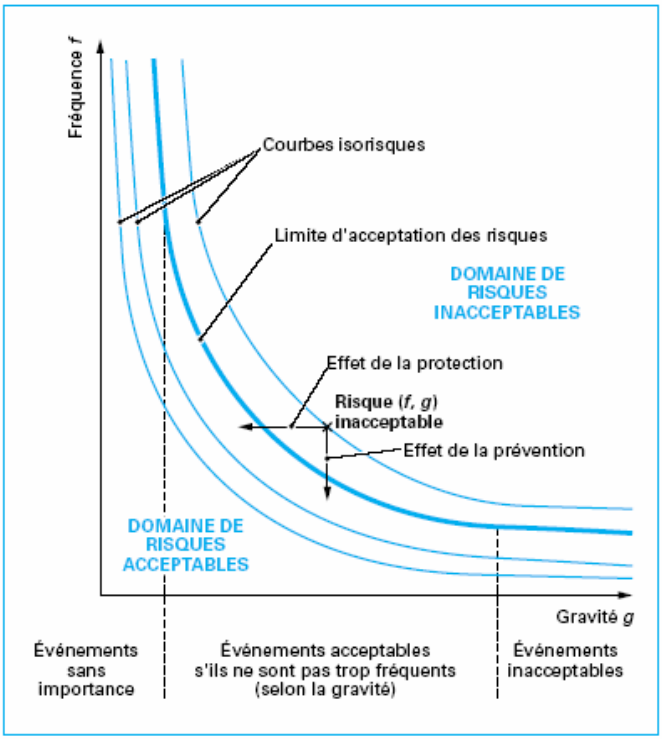


Figure 5 : Diagramme de Farmer [MOR, 05]

Dans la pratique, la sélection du niveau d'acceptabilité est souvent non binaire, c'est la raison pour laquelle des échelles de risques ont été définies ; elles sont détaillées en annexe 3.
L'introduction d'échelles à plusieurs niveaux permet d'affiner et de rendre plus conforme à la réalité la démarche d'acceptation du risque. Néanmoins quelle que soit l'échelle adoptée, l'affectation d'un niveau de risque reste subjective et directement liée à la perception que l'on peut avoir de ce risque.

Perception du risque

Dans le domaine de la perception des risques, son évaluation est considérée comme étant à la fois diachronique (évolue dans le temps) et synchronique (prend en compte plusieurs items) [DEN, 98].

Cette évaluation est diachronique puisque les perceptions se modifient au cours du temps, par exemple lors de l'acquisition de nouvelles informations. C'est un facteur explicatif du fait que la perception de risque est plus importante dans notre société que par le passé, ce qui ne minimise en rien l'accroissement des risques, bien réel, dû à la complexification des activités humaines.
Elle est également synchronique puisque le risque couvre un champ extrêmement vaste recoupant à la fois différents domaines (industriel, constructif, etc.), différents éléments déclencheurs (*naturels* – tremblements de terre – *humains* – sabotages – *sociaux* – émeutes), différents acteurs et différents dilemmes (économiques, sociologiques, etc.).

Des analyses psychométriques ont révélées que les profanes perçoivent les risques à partir d'une multiplicité de caractéristiques, contrairement aux experts, qui généralement, fondent leurs jugements sur le nombre de morts ou le nombre d'accidents, sur une période de temps donnée. Par ailleurs, le risque perçu tend à être inversement proportionnel aux bénéfices perçus. Cela signifie que la perception des bénéfices viendrait en quelque sorte tempérer le jugement des conséquences négatives d'un danger. Et plus il y a perception que l'activité ou la technique est à haut risque, plus il y a perception que des mesures de régulation sont nécessaires.

Les facteurs influençant la perception du risques sont généralement classés [DEN, 98] en trois catégories :

- *facteurs psychologiques*, tels que la facilité de se souvenir, l'accoutumance au danger, la maîtrise des paramètres engendrant le risque,
- *facteurs sociologique*s, tels que le statut social, l'âge, les spécificités professionnelles,
- *facteurs médiatiques et culturels*.

II.2.2. Distinction entre risque et criticité

Dans le domaine industriel – et dans le domaine de la construction, lorsqu'elle est évaluée [HAG, 02] – l'analyse de la criticité est réalisée en phase de conception du produit, c'est-à-dire qu'elle étudie la structure, le fonctionnement et les modes de réalisation prévus de ce produit. Dans la démarche d'AMDEC, l'analyse de la criticité consiste à quantifier les phénomènes de dégradation puis à les hiérarchiser afin de définir les actions préventives à entreprendre (par exemple, la modification d'un composant, l'amélioration d'une phase de réalisation).
Dans ce contexte, l'analyse de la criticité peut être qualifiée d'analyse des risques de dysfonctionnements puisque l'impact de l'environnement sur le produit et inversement l'impact du produit sur son environnement en phase de réalisation (autres produits, moyens de réalisation, tiers / employés) sont pris en compte.

Notre approche est différente de celle citée ci-dessus ; pour nous (*cf.* IV.3 de la partie B), l'analyse de la criticité permet de quantifier les scénarii de dégradation afin de les hiérarchiser et de n'étudier par la suite que les scénarii les plus critiques. Nous nous intéressons à la phase en service des produits et à ce stade de l'avancement de nos travaux de recherche nous prenons en compte l'impact de l'environnement sur le produit et en partie l'impact du produit sur les autres produits mais nous ne sommes pas en mesure de quantifier la globalité de l'impact du produit sur son environnement (environnement climatique, tiers, etc.) ; c'est la raison pour laquelle nous emploierons dans la suite de ce mémoire les termes d'analyse de la criticité et non d'analyse des risques.

II.2.3. Concepts et outils d'évaluation de la criticité

Le panorama des pratiques actuelles d'AMDEC, dans le domaine industriel, proposé dans [FAU, 04], montre que les échelles d'évaluation des critères de criticité et parfois les critères eux-mêmes dépendent des produits étudiés. Les principaux critères et méthodes d'agrégation rencontrés sont présentés ci-après.

L'évaluation de la criticité et sa définition ont évolué depuis la méthode originelle proposée dans la norme américaine MIL-STD-1629 A [DEP, 80], reprise par G. Zwingelstein [ZWI, 96], où la criticité est « une mesure relative des conséquences d'un mode de défaillance et de sa fréquence d'apparition » et l'analyse de criticité est « la procédure avec laquelle chaque mode potentiel de défaillance est classé en prenant en compte simultanément l'influence combinée de sa sévérité et de sa fréquence d'occurrence ».

Différentes formulations de la criticité

Formulation à deux critères

La formulation de la criticité proposée dans [SCT, 03] et [FAU, 04], prend en compte la fréquence / occurrence d'une défaillance et la gravité de ses conséquences. Ces deux critères sont évalués à partir de grilles de cotation, qualitatives ou quantitatives, dont des exemples sont donnés au tableau 3, puis la criticité est déterminée à partir d'une matrice de criticité, reliant les valeurs prises par ces deux critères, dont un exemple est donné à la figure 6. Cette formulation de la criticité présente l'avantage d'être « progressive » (à l'opposé de l'approche binaire : acceptable ou inacceptable) puisque différentes classes de criticité sont définies.

Fréquence						
1. Défaillance très fréquente	16	26	36	46	56	66
2. Défaillance assez fréquente	15	25	35	45	55	65
3. Défaillance peu fréquente	14	24	34	44	54	64
4. Défaillance probable	13	23	33	43	53	63
5. Défaillance rare	12	22	32	42	52	62
6. Défaillance extrêmement rare	11	21	31	41	51	61
	1. Effet négligeable	2. Effet mineur	3. Effet significatif	4. Effet sérieux	5. Effet majeur	6. Effet catastrophique

Gravité

Figure 6 : Exemple de matrice de criticité – cas d'une installation frigorifique à l'ammoniac [CET, 97]

Formulations à trois critères

Les trois critères pris en compte ici sont la fréquence / occurrence des défaillances, leur sévérité / gravité et leur détection / détectabilité / non détection / non détectabilité. Il existe ensuite trois approches d'évaluation puis d'agrégation de ces critères.

Première approche [CET, 97], [LAS, 01], [FAU, 04], [GAB, 06]

Cette approche est la plus couramment utilisée ; elle consiste à évaluer chaque critère indépendamment (O – Occurrence, G – Gravité, D – Détectabilité) à l'aide de grilles de cotation (*cf.* tableau 3) qualitatives ou quantitatives ; la criticité est alors définie par :

$$C = O \times G \times D \quad \textbf{[1]}$$

Les défaillances sont ensuite classées de manière binaire à partir d'un seuil de criticité fixé par l'analyste :

Si $C < C_{seuil}$ alors la défaillance est incluse dans le domaine acceptable
Sinon la défaillance est incluse dans le domaine inacceptable (défaillance critique).

Occurrence	Probability of the Cause-Failure-Effect Chain Occurring
0	Physically impossible
1	1 in 1 million
2	1 in 500,000
3	1 in 100,000
4	1 in 50,000
5	1 in 10,000
6	1 in 5,000
7	1 in 1,000
8	1 in 100
9	1 in 10
10	1 in 2

Occurrence – cas d'un double vitrage [HAG, 02b]

Niveau	Gravité	Impact sur la sécurité et l'environnement
1	Effet négligeable	Pas de dommage pour les personnes Pas de dommage pour l'environnement
2	Effet mineur	Dommage très faible aux personnes (gêne olfactive et oculaire) Pas de dommage pour l'environnement
3	Effet significatif	Dommage faible aux personnes (irritation cutanée, oculaire ou respiratoire) Pollution limitée de l'air ou de l'eau ayant une faible incidence sur l'environnement
4	Effet sérieux	Dommage réversible aux personnes (accident respiratoire) Pollution étendue de l'air ou de l'eau ayant une incidence sérieuse sur l'environnement (perte d'une récolte, perte d'animaux)
5	Effet majeur	Dommage irréversible aux personnes (brûlure grave, œdème du poumon, séquelles oculaires) Pollution importante du sol, de l'air ou de l'eau ayant une incidence majeure sur l'environnement (destruction de la faune et de la flore sauvages, contamination des sols)
6	Effet catastrophique	Effet létal

Gravité – cas d'une installation frigorifique à l'ammoniac [CET, 97]

Rank	Detectability	Meaning
1,2	Very high	Program will almost certainly detect a potential design weakness
3,4	High	Program has a good chance to detecting a potential design weakness
5,6	Moderate	Program may detect a potential design weakness
7,8	Low	Program is not likely to detect a potential design weakness
9	Very low	Program probably will not detect a potential design weakness
10	Non-detection	Program cannot detect a potential design weakness or there is no design verification program

Détectabilité - cas d'un programme informatique [BOW, 95]

Tableau 3 : Exemples de grilles de cotation

Deuxième approche [SAH, 06]

Cette approche est applicable à des systèmes industriels pour lesquels le temps moyen entre défaillance (MTBF) et le temps moyen de réparation (MTTR) sont disponibles. Dans ce cas, la fréquence de défaillance est par définition égale à l'inverse du MTBF, la gravité de défaillance est égale au MTTR et la non détection correspond au temps mis pour détecter la défaillance. La criticité correspond alors au produit des valeurs de ces trois critères pondérés par des poids supérieurs ou égaux à 1, dont la méthode d'évaluation n'est pas détaillée.

Troisième approche [BOW, 95], [PIL, 03], [GUI, 04]

Les valeurs des trois critères de criticité sont évaluées à l'aide de grilles de cotation (*cf.* tableau 3) qualitatives et quantitatives à dix niveaux, puis transformées en cinq classes linguistiques – selon la terminologie des sous-ensembles flous – (mineure, faible, modérée, élevée et très élevée) pour l'occurrence et la sévérité et en six classes linguistiques (très élevée, élevée, modérée, faible, très faible et non détectable) pour la non-détectabilité. La fonction d'appartenance associée à la détectabilité est présentée à la figure 7.

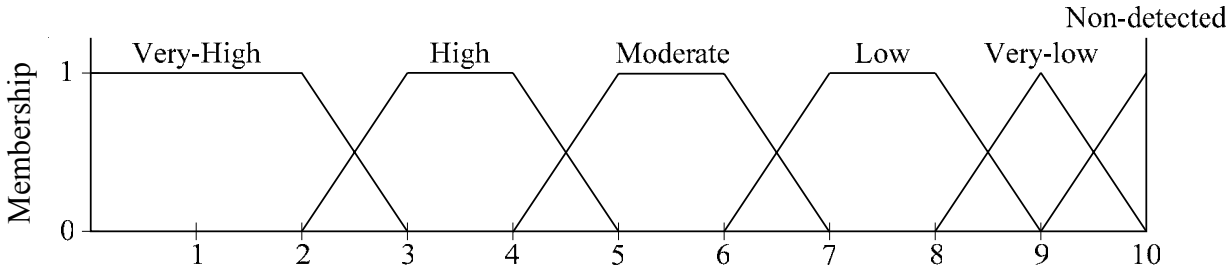


Figure 7 : Fonction d'appartenance de la détectabilité [BOW, 95]

La criticité est définie sur une échelle à dix valeurs par six classes linguistiques (non importante, mineure, faible, modérée, importante et très importante) ; sa valeur est obtenue soit :

- à partir de règles (présentées au tableau 4) prédéfinies reliant les classes prises par ces trois critères, par exemple si l'*occurrence* est faible, que la *sévérité* est élevée et la *détectabilité* est faible alors la *criticité* est importante,
- à partir de la méthode du maximum de vraisemblance (appliquée à des sous-ensembles flous).

Rule #	Occurrence	Severity	Detectability	Risk
1	Low	Moderate	Non-detected → Moderate	Moderate
2	Low	High	Non-detected → Moderate	Important
3	Low	Very High	Non-detected → Low	Very important
4	Low	Very High	Moderate	Important
5	Moderate	Moderate	Low → Moderate	Moderate
6	Moderate	High	Non-detected → Low	Very important
7	Moderate	High	Moderate → Very high	Important
8	Moderate	Very high	Non-detected → Moderate	Very important

Tableau 4 : Règles d'obtention de la criticité – approche avec sous-ensembles flous

Formulation à cinq critères [DEP, 80], [ZWI, 96]

Il s'agit de la formulation originelle de la criticité proposée dans la norme américaine MIL-STD-1629 A. Les cinq critères pris en compte sont :

- *probabilité de l'effet de la défaillance* (β), évaluée à l'aide d'une grille de cotation présentée dans le tableau 5,
- *pourcentage du mode de défaillance* (α), c'est-à-dire la probabilité, exprimée en valeur décimale, pour qu'une pièce ou un élément soit défaillant selon le mode considéré,
- *taux de défaillance des pièces* (λ_p), c'est-à-dire le nombre de défaillances réellement observées sur une période donnée de fonctionnement,
- *temps de fonctionnement* (t) de l'élément,
- *sévérité*, déterminée par la gravité des blessures, des dommages causés aux bâtiments.

Effets des défaillances	Valeur de β
Perte effective	1
Perte probable	$0,1 < \beta < 1$
Perte possible	$0 < \beta < 0,1$
Pas d'effet	0

Tableau 5 : Grille de cotation de l'effet de défaillance

Les quatre premiers critères sont agrégés en un seul critère, nommé nombre de criticité du mode de défaillance, noté C_m et défini par :

$$C_m = \beta \cdot \alpha \cdot \lambda_p \cdot t \quad [2]$$

L'évaluation du nombre de criticité d'un mode de défaillance peut être remplacée par la détermination du niveau de probabilité d'apparition de ce mode de défaillance ; il existe cinq niveaux de probabilité d'apparition présentés dans le tableau 6 :

Niveau	Définition
A – Fréquent	La probabilité est définie pour un mode de défaillance unique par une valeur supérieure à 20% de la probabilité globale de défaillance pendant *t*.
B – Raisonnablement probable	La probabilité d'apparition est définie pour un mode de défaillance unique par une valeur comprise entre 10% et 20% de la probabilité globale de défaillance pendant *t*.
C – Occasionnel	La probabilité d'apparition est définie pour un mode de défaillance unique par une valeur comprise entre 1% et 10% de la probabilité globale de défaillance pendant *t*.
D – Réduit	La probabilité d'apparition est définie pour un mode de défaillance unique par une valeur comprise entre 0,1% et 1% de la probabilité globale de défaillance pendant *t*.
E – Extrêmement improbable	La probabilité est définie pour un mode de défaillance unique par une valeur inférieure à 0,1% de la probabilité globale de défaillance pendant *t*.

Tableau 6 : Grille de cotation du niveau de probabilité d'apparition d'un mode de défaillance

La sévérité d'un mode de défaillance est évaluée sur une échelle qualitative à quatre niveaux :

- catégorie I – catastrophique : défaillance qui peut entraîner la mort de personnes ou la destruction du système d'armes (avion, tank, missile, navire, etc.),
- catégorie II – mineure : défaillance qui peut entraîner des blessures graves, des dommages aux constructions ou des dommages majeurs sur le système qui conduisent à la perte de la mission,
- catégorie III – marginale : défaillance qui peut entraîner des blessures légères, des dommages mineurs aux constructions ou des dommages mineurs sur le système conduisant à un retard, une perte de disponibilité ou à la dégradation de la mission,
- catégorie IV – négligeable : défaillance qui n'est pas suffisamment importante pour causer des blessures, des dommages aux constructions, des dommages au système mais qui peuvent entraîner une maintenance ou une réparation non programmée.

La matrice de criticité, dont un exemple est donné à la figure 8, permet de comparer la criticité de chaque mode de défaillance par rapport aux autres. Il s'agit dans un premier temps de tracer le seuil (représenté en pointillé à la figure 8) à partir duquel des actions préventives / correctives doivent être entreprises, puis dans un deuxième temps, de placer l'ensemble des modes de défaillance d'un élément dans cette matrice. Les modes de défaillances situés au dessus du seuil seront nécessairement plus critiques que ceux placés en dessous.

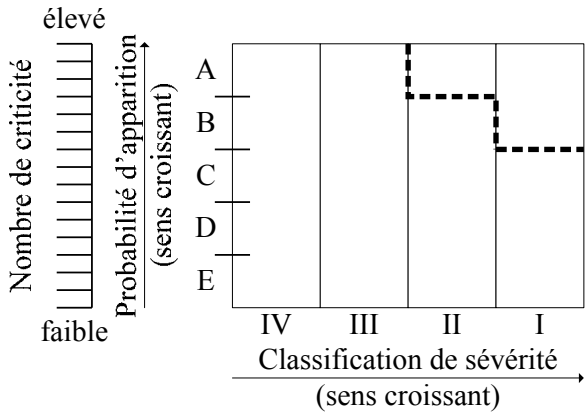


Figure 8 : Exemple de matrice de criticité – formulation à cinq critères

Apport de l'analyse de la criticité

Dans le domaine industriel, l'analyse de la criticité est basée sur une approche itérative permettant d'améliorer la conception d'un produit ou de sa réalisation, par quantification de la criticité de l'ensemble des modes de défaillance identifiés à l'aide d'une AMDE, modifications du produit ou de sa réalisation, réévaluation de la criticité et ainsi de suite jusqu'à ce que l'ensemble des modes de défaillances présente un niveau de criticité inférieur à un seuil fixé par les concepteurs. Cette démarche est illustrée à la figure 9.

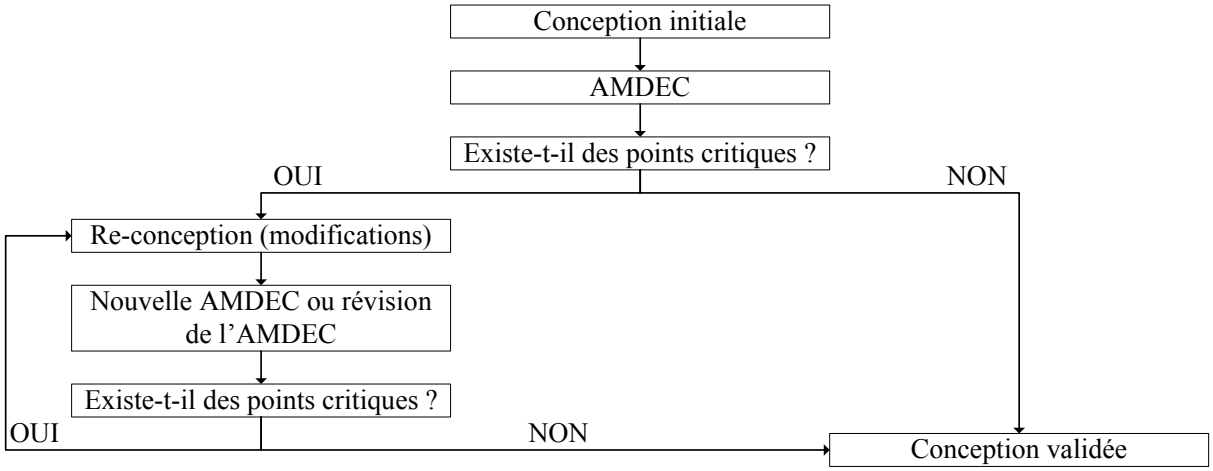


Figure 9 : Démarche itérative de l'analyse de la criticité [FAU,04]

Remarque : un point critique est une défaillance qui a une valeur de criticité supérieure au seuil de criticité fixé par le concepteur.

II.2.4. Synthèse et analyse critique

Les critères d'évaluation de la criticité sont soit l'occurrence et la gravité d'une défaillance – la criticité si elle est égale à leur produit est alors semblable au risque – soit l'occurrence, la gravité et la détectabilité d'une défaillance.

Cas du domaine industriel

Ces critères sont particulièrement bien adaptés au domaine industriel en phase de conception et de réalisation d'un produit puisque :

- l'occurrence peut « facilement » être quantifiée, en effet, les produits conçus et réalisés sont semblables, il est donc possible de « compter » les défaillances sur une « population » identique de produits,
- la gravité est également quantifiable car l'environnement des produits est connu (déterminé) et il est possible d'influer sur son comportement (par exemple, en avertissant les employés du risque encouru),
- la détectabilité peut être mise en œuvre (par exemple, procédure systématique de contrôle des éléments de sécurité des voitures en sortie de chaine de fabrication).

Remarque : l'exemple de la méthode d'évaluation de la criticité proposée par R. Hage [HAG, 02] – traitant d'un produit de construction – peut être assimilé à une problématique industrielle, puisqu'il s'intéresse à la phase de fabrication d'un double vitrage.

Environnement aléatoire des produits de construction

Les principales différences entre le domaine industriel et le domaine de la construction, vis-à-vis de l'évaluation de la criticité, résident dans le fait que l'on souhaite connaître le produit en service, or les produits sont différents les uns des autres et leur environnement est aléatoire. De ce fait, il n'est pas possible d'appliquer directement l'une des méthodes précédentes, il sera nécessaire de définir une méthode spécifique.

Prise en compte du temps

Dans les formulations de la criticité, présentées ci-avant, le temps est directement intégré soit dans l'occurrence, soit dans la gravité. L'échelle de temps du domaine industriel est très fortement différente de celui de la construction (la réalisation d'un produit industriel se compte en mois, lorsque la durée de vie d'un produit de construction est évaluée en années) ; c'est la raison pour laquelle, il nous semble pertinent de considérer la durée d'un scénario comme un critère de la criticité à part entière, sachant que ce critère est lié à la probabilité d'apparition de ce scénario.

Critère « détectabilité »

L'auscultation systématique des produits de construction et des bâtiments tend à se développer, mais n'est pas encore une pratique généralisée, les données d'auscultation étant encore difficilement accessibles. De ce fait, la détectabilité sera pratiquement toujours la même pour toutes les dégradations puisqu'il n'y aura pas de moyens d'observer leur apparition potentielle. Il nous semble donc plus pertinent de considérer la détectabilité comme un facteur pouvant faire varier la gravité d'une dégradation ; nous l'intégrerons donc dans le critère gravité.

En conclusion, la criticité d'un scénario est, pour nous, une combinaison de trois critères : la probabilité d'apparition de ce scénario, sa durée et sa gravité.

II.3. Etat de l'art sur l'évaluation de la durée de vie

Les données temporelles sont indispensables à l'évaluation des performances d'un produit de construction ; l'étape de quantification temporelle de la méthodologie que nous proposons en partie B s'appuie sur des méthodes et outils existants d'évaluation de la durée de vie. C'est la raison pour laquelle, ce paragraphe est consacré à un état de l'art sur l'évaluation de la durée de vie des entités constructives (matériau, produit, bâtiment). Nous présentons d'abord les types de données de durée de vie existants et leur méthode d'acquisition (*cf.* II.3.1) puis nous détaillons les méthodes de traitement de ces données permettant d'estimer ou d'évaluer la durée de vie d'une entité constructive (*cf.* II.3.2).

II.3.1. Type et acquisition des données de durée de vie

a) Types de données de durée de vie

Nous distinguons deux types de données de durée de vie :

- **données expérimentales** : ensemble des données qualitatives et quantitatives résultant d'une expérience définie dans le Larousse comme « épreuve, essai effectués pour étudier un phénomène » (*cf.* II.3.1-b et c),
- **données élaborées** : ensemble des données quantitatives résultant du traitement de données expérimentales (*cf.* II.3.2).

Les données expérimentales de durée de vie sont obtenues par des essais de vieillissement ou du suivi d'ouvrage en œuvre.

b) Essais de vieillissement : acquisition des données expérimentales

La deuxième partie de l'ISO 15686 [ISO, 05b] propose de classer les essais de vieillissement des entités constructives selon leur durée d'exposition :

1. **exposition de longue durée** : la durée d'exposition est semblable à la durée de vie en service de l'entité constructive étudiée ;
2. **exposition de courte durée** : la durée d'exposition est très nettement inférieure à la durée de vie en service de l'entité considérée. L'European Organisation for Technical Approvals (EOTA) stipule les équations suivantes [EOT, 99] :

   Durée d'exposition ≥ Durée de vie de conception / 10 (*cas recommandé*)

   Durée d'exposition > Durée de vie de conception / $10^{1,5}$ (*cas exceptionnel*) **[3]**

   Par exemple, pour une durée de vie de conception de 100 ans, la durée d'exposition doit être supérieure à 10 ans et elle ne doit en aucun cas être inférieure à 3 ans et 2 mois.

Les différents types d'essais de vieillissement en exposition de longue durée et en exposition de courte durée sont présentés en annexe 4.

c) Comparaison des essais de vieillissement

Le tableau 7 présente le(s) niveau(x) des entités constructives sur l'échelle géométrique auquel(s) sont réalisés les différents essais de vieillissement, leur intérêt et les contraintes / limites de ces essais.

Essais	Echelle	Intérêts	Limites
Exposition sur le terrain (longue durée)	Matériau Produit	Conditions climatiques réelles.	**(1)** Incertitudes sur les conditions climatiques (nature, intensité, fréquence). **(2)** Extrapolation à d'autres produits ou d'autres sites difficile.
Inspection des bâtiments (longue durée)	Matériau Produit Bâtiment	**(1)** Matériaux / produits / bâtiments réels. **(2)** Coût d'expérimentation plus faible.	**(1)** Conditions climatiques et d'usage non mesurées. **(2)** Problèmes de censure. **(3)** Extrapolation à d'autres entités constructives ou d'autres sites difficile. **(4)** Conditions d'entretien parfois mal connues
Exposition dans des bâtiments expérimentaux (longue durée)	Matériau Produit Bâtiment	**(1)** Conditions climatiques réelles. **(2)** Connaissance du comportement global.	**(1)** Incertitudes sur les conditions climatiques. **(2)** Extrapolation à d'autres entités constructives ou d'autres sites difficile.
Exposition en service (longue durée)	Produit Bâtiment	**(1)** Produits / bâtiments réels. **(2)** Conditions climatiques et d'usage réelles. **(3)** Connaissance du comportement global. **(4)** Coût d'expérimentation plus faible.	**(1)** Nombreuses incertitudes sur les conditions climatiques et d'usage. **(2)** Extrapolation à d'autres entités constructives ou d'autres sites difficile.
Exposition de courte durée accélérée	Matériau Produit	**(1)** Maîtrise des conditions climatiques. **(2)** Temps et coût d'expérimentation réduits.	Eventuelle imprécision lors du passage au temps réel.
Exposition en service de courte durée	Produit	**(1)** Conditions climatiques et d'usage réelles. **(2)** Temps et coût d'expérimentation réduits.	**(1)** Nombreuses incertitudes sur les conditions climatiques et d'usage. **(2)** Extrapolation à d'autres entités constructives ou d'autres sites difficile.

Tableau 7 : Comparaison des essais de vieillissement des entités constructives

II.3.2. Traitement des données de durée de vie

L'évaluation de la durée de vie peut être vue comme une épreuve « quel est le laps de temps pour qu'au moins une fonction ou une combinaison de fonctions d'un produit atteigne son seuil de défaillance ? » dont la variable à mesurer est une durée influencée par un ensemble de paramètres.
Dans le contexte de l'évaluation des durées de vie, les méthodes de traitement combinent généralement plusieurs modèles de données.

a) Approche fiabiliste

L'étude de la fiabilité d'une entité constructive consiste à quantifier la probabilité d'atteinte de ses états limites. Deux états limites se distinguent :

- **état limite de service :** la résistance de l'entité constructive a atteint son seuil de défaillance. Le seuil de défaillance est fixé par l'utilisateur et / ou des règlementations, il correspond à un niveau de fonctionnement de l'entité constructive au dessous duquel cet utilisateur n'est plus satisfait ;
- **état limite ultime :** correspond à la ruine de l'entité constructive. Cette entité n'a plus les capacités mécaniques / physiques / chimiques pour assurer ses fonctions requises.

Remarque : nous nous intéressons dans la suite de ce mémoire, à l'atteinte par les entités constructives de leur état limite de service.

Un état limite est atteint lorsque la sollicitation *S*, par l'environnement climatique et d'usage, devient supérieure à la résistance *R* d'une entité. Dans une démarche probabiliste, la résistance et la sollicitation sont modélisées par des variables aléatoires afin de prendre en compte leurs méconnaissances et leur variabilité. Le niveau de fiabilité d'une entité constructive sera alors caractérisé par la probabilité de défaillance, c'est-à-dire la probabilité que $R - S$ soit inférieure à zéro [CRE, 03].

Dans ce contexte, la durée de vie d'une entité constructive est également modélisée par une variable aléatoire et correspond au laps de temps séparant la mise en service d'une entité et l'atteinte de son état limite de service.

La difficulté liée à ce type d'approche réside dans la détermination des lois de distribution associées à la résistance et à la sollicitation, pour qu'elles soient les plus réalistes possibles. Des études continuent à être menées pour les matériaux de construction, telles que proposées dans [AUG, 03], mais les moyens nécessaires à une telle détermination étant conséquents, il semble difficile d'utiliser une telle approche pour l'évaluation de la durée de vie de produits ou de bâtiments.

b) Approche statistique

Considérant une épreuve et un échantillon fixés, l'approche statistique consiste à observer le nombre / la fréquence d'apparition d'une variable, puis à en déduire sa loi de distribution.

La détermination des lois de survie des chaussées [COU, 97] et [REC, 04], est par exemple basée sur une approche statistique ; pour un ensemble de tronçons fixés (échantillon) il s'agit à des dates fixes de relever des indicateurs de dégradation, tels que des fissures, pour en déduire son état (épreuve).

Dans le domaine de la construction, des démarches internationales, tel que le projet Investimmo [CST, 06] intégrant le logiciel EPIQR (Energy Performance Indoor environment Quality Retrofit) [BRA, 99], et des démarches nationales, telles que celles menées par l'OPAC, visent par auscultation des produits et bâtiments à connaître leur état de dégradation et ainsi gérer au mieux leur maintenance.

L'approche bayésienne peut s'apparenter à une approche statistique dans la mesure où ayant fixé des lois de distribution a priori, elle permet, à l'aide de données statistiques, d'en déduire des lois de distribution a posteriori [PRO, 03]. L'avantage d'une telle approche est de pouvoir affiner un modèle de comportement initial en intégrant des données de retour d'expérience.

La difficulté de l'approche statistique dans le contexte de la construction réside dans la détermination de la granularité d'étude la plus pertinente ; par exemple :

- l'étude d'une fenêtre particulière (par exemple, une fenêtre composée d'un double vitrage feuilleté à l'extérieur et trempé à l'intérieur, avec un cadre en aluminium anodisé) dans un environnement spécifique (par exemple, en France à moins de 10km de la côte) impliquera un échantillon réduit et donc une difficulté de détermination d'une loi de distribution,
- l'étude d'une fenêtre non spécifiée dans un environnement non caractérisé augmentera la taille de l'échantillon mais diminuera la précision du modèle déduit de cette étude et les informations que l'on peut en tirer.

c) Modèles de mécanismes de vieillissement

Les modèles de mécanismes de vieillissement des matériaux sont générés soit par :

- approche 1 : expérimentations puis déduction d'une formulation et enfin validation par de nouvelles expérimentations,
- approche 2 : proposition d'une formulation puis validation et calage par expérimentations.

Dans le domaine de la construction, la première approche est très répandue ; une méthodologie d'obtention de mécanismes de vieillissement, selon cette approche, consiste à comparer les résultats obtenus par des tests de vieillissement de courte durée accélérée avec des tests de vieillissements de longue durée. Connaissant l'ensemble des dégradations conduisant à la défaillance du matériau (test de courte durée accélérée) et les dates de réalisation des premières dégradations (test de longue durée) il est possible d'en déduire la date de défaillance, donc la durée de vie du produit. Les étapes de cette méthode sont détaillées à la figure 10.

En préparant une application de cette méthodologie, il est essentiel de réaliser un plan d'expériences [PIL, 94] et [LAS, 01] afin d'optimiser les coûts d'expérimentation.

Une difficulté de cette méthodologie réside dans l'évaluation du facteur d'échelle entre les conditions d'« accélérations » des sollicitations des deux types d'essais. Les « dose-response functions » permettent d'aider cette évaluation.

Une dose-reponse function permet d'expliquer le mécanisme physico-chimique existant entre la concentration d'un agent environnemental (dose) et le comportement du matériau (response). De nombreuses études et programmes de recherches ont été menés en Europe, aux Etats-Unis et au Canada, afin d'obtenir ces fonctions pour la plupart des matériaux de construction [JER, 04] et [HAA, 96].

Haagenrud *et al.* [HAA, 85] ont par exemple étudié la corrosion de plusieurs métaux en zone urbaine (Sarpsborg / Fredikstad) pendant quatre ans sur treize sites. Une synthèse des résultats de leur étude est présentée dans le tableau 8.

Métal	Dose-response function	Taux d'humidité relative
Fer	$K_{Fe} = 7{,}6 \times SO_2 + 172$	93 %
Zinc	$K_{Zn} = 0{,}35 \times SO_2 + 0{,}01 \times TOW - 21{,}8$	94 %
Cuivre	$K_{Cu} = 0{,}14 \times SO_2 + 0{,}007 \times TOW - 16{,}9$	91 %
Aluminium	$K_{Al} = 0{,}01 \times SO_2 + 0{,}00053 \times TOW - 1{,}2$	
K est en g/m²/an *TOW* : temps d'exposition (time of wetness), est en h/an		

Tableau 8 : Dose-response functions de plusieurs métaux [HAA, 85]

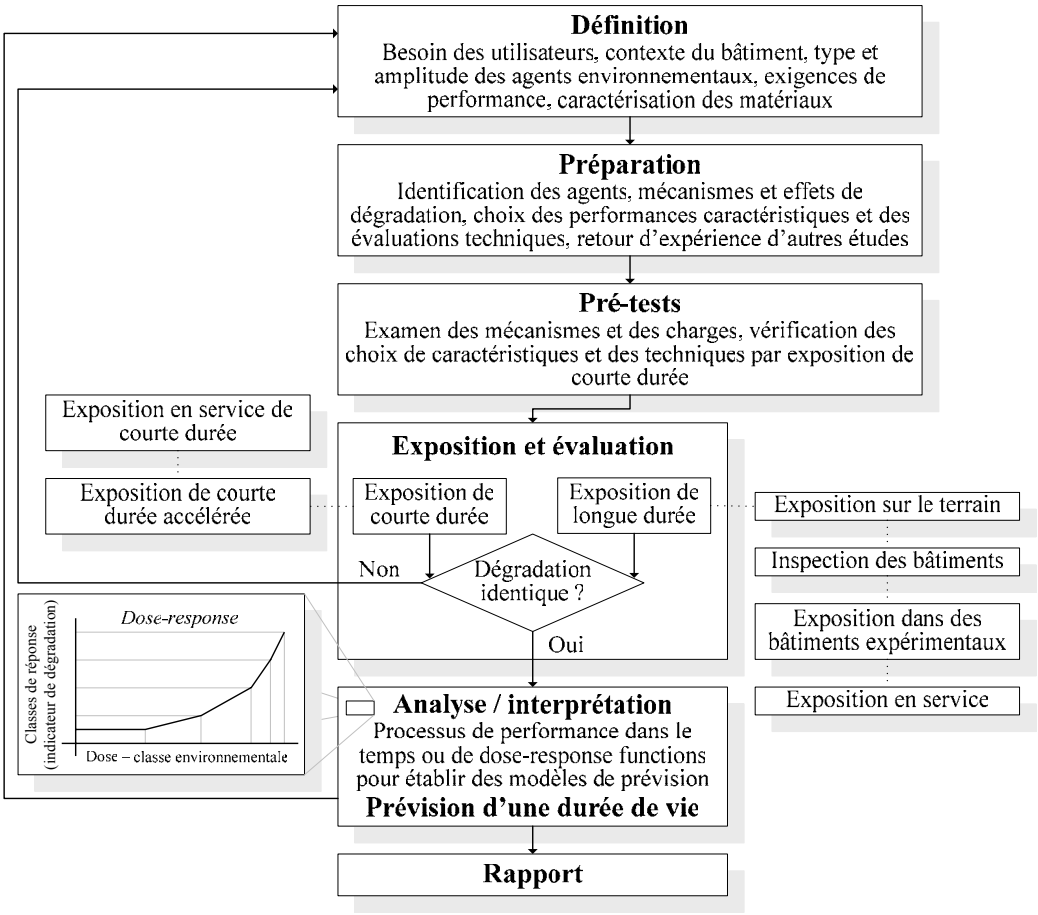


Figure 10 : Méthodologie d'évaluation de la durée de vie d'un matériau – comparaison expositions courte durée accélérée et longue durée [JER, 04]

d) Dires d'expert

Un dire d'expert est l'association de faits (données expérimentales telles que définies au II.3.1-a) et de règles expertes, par exemple, s'il existe une tâche brunâtre sur un enduit de façade (fait) elle peut être due à la présence d'humidité et de microorganisme (règle experte). Un dire d'expert est qualitatif et/ ou quantitatif.

L'utilisation des connaissances expertes requiert deux phases : (1) l'élicitation, c'est-à-dire le recueil de ces connaissances, et (2) leur formalisation [CAH, 91].

1) Elicitation des dires d'expert

Différentes techniques ont été développées pour recueillir cette connaissance experte [MUC, 94] :

- *introspection* : auto-analyse de l'expert des connaissances qu'il possède. Les limites à cette méthode sont d'une part l'aspect très subjectif des retranscriptions de l'expert et d'autre part des erreurs de compréhension lors de l'utilisation de ces données ;
- *description phénoménologique* : méthode de description du vécu, en éliminant le plus rigoureusement possible l'explication de ce phénomène. Il s'agit donc d'une retranscription des faits observés par l'expert sans analyse par règle experte. Cette méthode semble peu répondre à notre problématique, puisque nous cherchons à recueillir les dires d'expert et non les faits observés par un expert ;

- *entretiens et interviews* : un interviewer cherche à recueillir directement ou indirectement les connaissances d'un ou de plusieurs interviewé (experts). Un entretien est soit directif (l'interviewer questionne l'interviewé) soit semi-directif (l'interviewé reformule régulièrement au cours de l'entretien les propos de l'interviewer et demande confirmation) soit non-directif / ouvert (l'entretien repose sur l'expression libre des idées de l'interviewé sur un sujet). Cette méthode semble la mieux adaptée à notre problématique, cependant la compréhension de l'interviewé par l'interviewer peut être partiellement inexacte, ce qui introduit de l'imprécision dans les données issues de dires d'expert.

2) Formalisation des dires d'expert

Un dire d'expert formulé par un expert et / ou retranscrit pas un interviewer est entaché d'incertitude et / ou d'imprécision. Les sous-ensembles flous, issus de la théorie de la logique floue, permettent de formaliser les dires d'expert en prenant en compte cette incertitude et imprécision.

Un sous-ensemble flou A de X est complètement défini, selon [BOU, 03] et [BOU, 95], par la donnée de sa fonction d'appartenance μ_A qui associe à tout élément x de X une valeur réelle $\mu_A(x)$ dans [0 ; 1].

Un sous-ensemble flou de type trapézoïdal A de X est décrit par plusieurs caractéristiques, schématisées à la figure 11 :

- **noyau** : $Noy(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\}$,
- **support** : $Supp(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\}$,
- **hauteur** : $h(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x)$, un sous-ensemble flou est normalisé si sa hauteur est égale à 1,
- **cardinalité** : $|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x)$,
- **α-coupe** : $A_\alpha = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$.

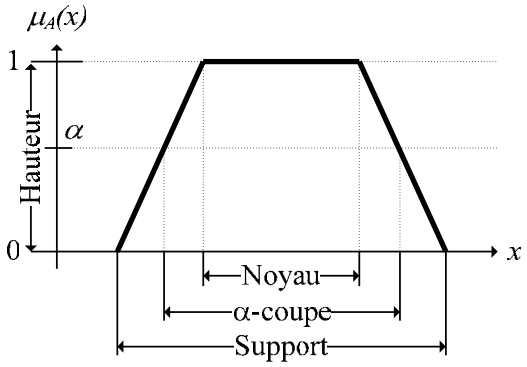


***Figure 11 : Caractéristiques d'un sous-ensemble flou trapézoïdal* A *de* X**

Les principales formes de fonction d'appartenance d'un sous-ensemble flou A de X, les paramètres permettant de les caractériser et leur signification dans le contexte des données de durée de vie sont présentés à la figure 12.

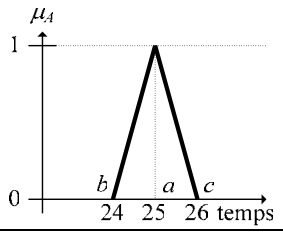
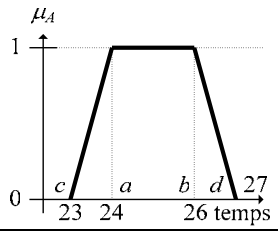
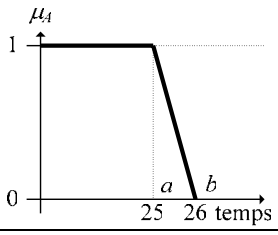
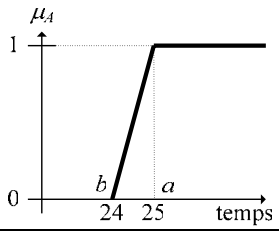
Représentation			
			
Forme triangulaire	Forme trapézoïdale	Forme triangulaire ouverte à gauche	Forme triangulaire ouverte à droite
Paramètres caractéristiques			
3 : *a*, *b* et *c*	4 : *a*, *b*, *c* et *d*	2 : *a* et *b*	2 : *a* et *b*
Signification			
Environ entre 24 et 26 ans	Approximativement entre 24 et 26 ans	Avant 25 ans	Au delà de 25 ans

Figure 12 : Principales formes de fonction d'appartenance

e) Méthode des facteurs

La méthode des facteurs est apparue dans une norme japonaise en 1989 et publiée en version anglaise en 1993 [AIJ, 93]. Une durée de vie estimée est exprimée sous la forme du produit d'une durée de vie de référence par un ensemble de facteurs relatifs aux caractéristiques de durabilité (performance du matériau, niveau de conception, niveau de mise en œuvre, niveau de maintenance) et de facteurs relatifs aux détériorations (conditions environnementales et d'usage). La formulation de ce produit dans cette norme dépend du type de produit de construction considéré.
Cette méthode des facteurs a été reprise par le groupe de travail international CIBW80 conjointement avec la Rilem (publication CIB n° 294 [HOV, 04]) et fait l'objet de la norme internationale ISO 15686 parties 1 et 8 [ISO, 05a] et [ISO, 05c].

La formulation de la méthode des facteurs (équation [4]), selon l'ISO 15686, est telle que la durée de vie estimée (ESLC) est égale au produit de la durée de vie de référence (RSLC) par sept facteurs (de A à G) définis dans le tableau 9 :

$$ESLC = RSLC \times \text{facteur } A \times \text{facteur } B \times \text{facteur } C \times \text{facteur } D \times \text{facteur } E \times \text{facteur } F \times \text{facteur } G \quad \textbf{[4]}$$

Facteurs			Conditions à prendre en compte (exemples)
Facteurs correspondants aux caractéristiques de qualité inhérentes	A	Qualité des composants	Fabrication, stockage, transport, matériaux, revêtements de protection (appliqués en usine).
	B	Niveau de conception	Incorporation, protection par le reste de la structure.
	C	Niveau de réalisation des travaux	Gestion du chantier, niveau d'exécution, conditions climatiques pendant la réalisation des travaux.
Environnement	D	Environnement intérieur	Agressivité de l'environnement, ventilation, condensation.
	E	Environnement extérieur	Hauteur du bâtiment, conditions micro-environnementales, émissions de la circulation, facteurs atmosphériques.
Conditions de fonctionnement	F	Conditions d'utilisation	Choc mécanique, catégorie d'utilisateurs, usure par détérioration naturelle.
	G	Niveau d'entretien	Qualité et fréquence de l'entretien, accessibilité pour l'entretien.

Tableau 9 : Facteurs de la méthode des facteurs [ISO, 05a]

La démarche générale consiste alors à chercher une durée de vie de référence qui soit la plus proche possible (en termes de caractéristiques de qualité inhérentes, d'environnement et de conditions d'utilisation) du cas d'étude dont on veut estimer la durée de vie, puis à moduler cette durée de vie de référence, à l'aide des valeurs des sept facteurs, en fonction des différences entre le cas de « référence » et le cas d'étude.
Si le cas de « référence » est identique au cas d'étude, alors la durée de vie estimée sera égale à la durée de vie de référence, et les sept facteurs prendront la valeur 1.

Remarques : toute donnée de durée de vie, pour laquelle l'ensemble des informations permettant de renseigner les valeurs des sept facteurs est connu, peut être considérée comme une durée de vie de référence. Une durée de vie de référence n'est pas une durée de vie « médiane » ; elle ne signifie pas nécessairement que les valeurs des facteurs associés sont égaux à 1.

Il n'existe, actuellement, pas de guide ou de directive d'estimation de ces sept facteurs ; la durée de vie estimée peut alors varier en fonction de l'utilisateur. La subjectivité de l'estimation d'une durée de vie par la méthode des facteurs, introduit donc une part d'imprécision à ce type de données.

Il existe trois axes de recherches visant à améliorer cette méthode des facteurs :
1. formulation de la méthode des facteurs,
2. recherche de données de durée de vie de référence,
3. aide à l'estimation des facteurs.

Remarque : le CSTB est impliqué dans ces deux derniers axes de recherches.

1) Formulation de la méthode des facteurs

Les approches de K. Moser [MOS, 99] et [MOS, 03], de F. Re Cecconi [REC, 03a] et de B. Teplý [TEP, 03] consistent à définir les sept facteurs comme des variables aléatoires et non déterministes comme le suggère l'ISO 15686. La durée de vie estimée est par conséquent donnée sous une forme probabiliste.
L'apport de F. Re Cecconi est un logiciel intégrant une simulation de Monte Carlo pour l'évaluation de la durée de vie estimée. B. Teplý suggère que chaque facteur dépend de plusieurs « sous-facteurs ».
La formulation classique (équation [4]) devient alors :

$$ESLC = RSLC \times \prod_{i=1}^{7} \left(\prod_{j=1}^{n_i} k_{ij} \right) \quad \textbf{[5]}$$

où les k_{ij} sont les sous-facteurs (variables probabilistes) de chaque facteur k_i et n_i est le nombre de sous-facteurs associé à chaque k_i.

L'approche proposée par G. Cusmano [CUS, 03] consiste à introduire des coefficients permettant de pondérer l'influence de chacun des sept facteurs pour des conditions climatiques et d'usage spécifiques. L'équation [4] devient alors :

$$ESLC = RSLC \times (\alpha_1 A + \alpha_2 B + \alpha_3 C + \alpha_4 F + \alpha_5 G) \quad \textbf{[6]}$$

$$\text{telle que } \sum_{i=1}^{5} \alpha_i = 1 \quad \textbf{[7]}$$

Les facteurs D et E n'apparaissent pas dans l'équation [6] puisque G. Cusmano considère que les environnements intérieur et extérieur influencent les cinq autres facteurs ; leur influence est par conséquent intégrée dans les valeurs des pondérations.

2) Recherche de données de durées de vie de référence

Le groupe de travail centré sur la partie 8 de l'ISO 15686 [ISO, 05c] s'intéresse à la collecte et à l'appréciation des données de durées de vie de référence.
Dans une optique de capitalisation des données de durées de vie française, le CSTB développe une base de données de durées de vie au format de la norme ISO 15686.

3) Aide à l'estimation des facteurs

Afin de réduire la subjectivité liée à l'estimation des sept facteurs, F. Re Ceconni [REC, 05] propose une méthode pour évaluer la valeur du facteur A (première phase de ses recherches) en sept étapes :

- décomposition du produit en composant,
- association des modes, causes (agents environnementaux et climatique) et effets de défaillance à chaque composant,
- recherche dans les normes de caractéristiques permettant d'évaluer ces modes de défaillance, ces caractéristiques sont nommées sous-facteurs,
- création de grilles d'évaluation des sous-facteurs à partir des prescriptions fournies dans les normes et à l'aide d'un panel d'experts,
- pondération des sous-facteurs,
- évaluation des sous-facteurs à l'aide des grilles d'évaluation,
- évaluation du facteur A : somme pondérée des valeurs obtenues pour chaque sous-facteur.

L'approche proposée par le CSTB consiste à définir des grilles d'estimation des facteurs, pour les principaux types de matériaux de construction, obtenues par consultation d'un panel d'experts.

f) Fusion des données de durée de vie

La fusion des données de durée de vie telle que l'a proposée J. Lair [LAI, 00] sur la base de la théorie de Dempster-Shafer [SHA, 76] consiste à obtenir une durée de vie consensuelle à partir d'un ensemble de données cohérentes et / ou conflictuelles auxquelles sont affectées des masses de croyance résultant de l'estimation de leur qualité. Le principe de cette fusion des données est détaillé en deuxième partie de ce mémoire (*cf.* I.2.3-d de la partie B)
L'intérêt de la fusion des données réside dans la possibilité d'utiliser l'ensemble des données disponibles qui correspondent plus ou moins parfaitement au système constructif étudié, de par leur structure, leur environnement, leur utilisation, leur démarche d'acquisition, …

Dans un souci d'optimisation de la démarche de fusion des données de durée de vie, un logiciel a été développé au CSTB, nommé Edifice. Il permet d'entrer des données de durées de vie de différents formats, d'aider à l'estimation de leur qualité, d'évaluer la donnée consensuelle selon différentes stratégies d'assemblage (*cf.* I.2.3-d de la partie B). Une capture d'écran des résultats que l'on peut obtenir avec ce logiciel (exemple d'une fenêtre en PVC) est présentée à la figure 13.

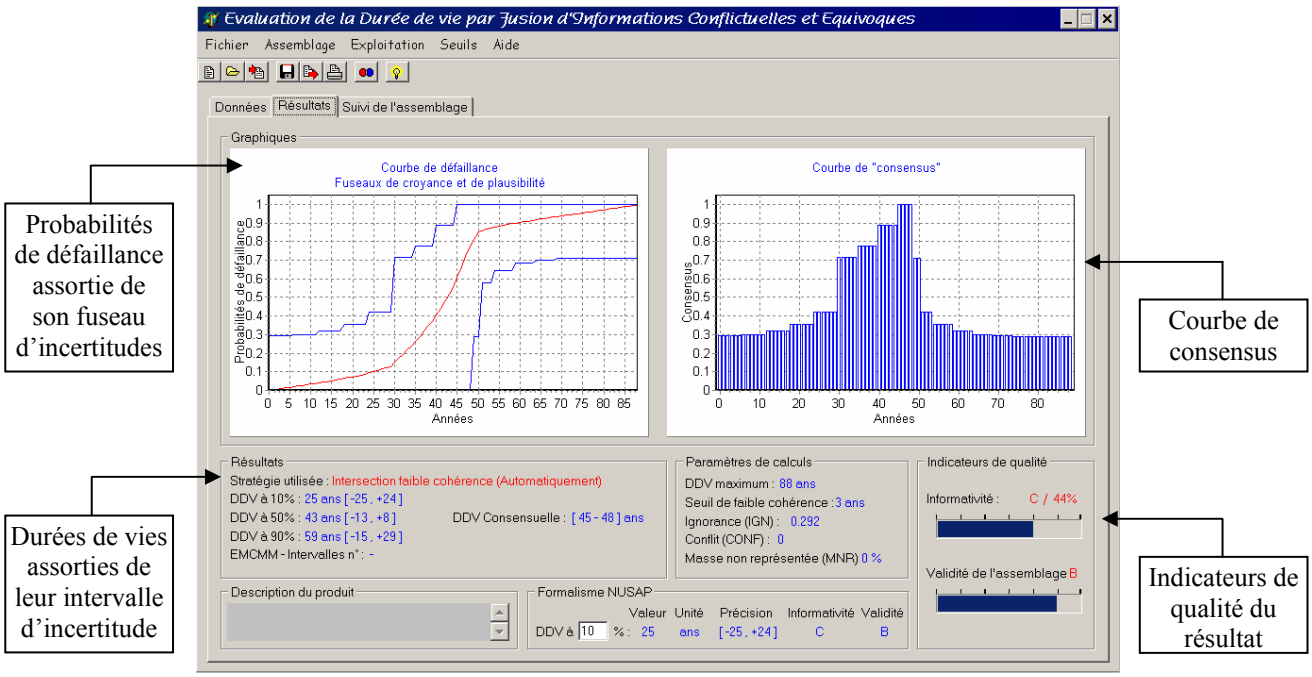


Figure 13 : Capture d'écran de résultats du logiciel Edifice – exemple d'une fenêtre en PVC [LAI, 03c]

Le fuseau d'incertitudes est d'autant plus proche de la courbe de probabilités de défaillance que les données en entrée ont une masse de croyance élevée ; par conséquent disposer de nombreuses données de « bonne qualité » (faible hypothèses de modélisation, méthode d'obtention et source fiables, donnée crédible) permettra d'amenuiser ce fuseau. Le développement de la base de données des durées de vie et la recherche d'amélioration de la méthode des facteurs, menés par le CSTB, vont dans ce sens.

La combinaison de la procédure de fusion des données de durées de vie et de l'AMDE des systèmes constructifs, proposée par J. Lair, conduit à une liste exhaustive des scénarii de défaillances prématurées de ces systèmes : les « raccourcis » à leur durée de vie.

g) Comparaison des approches de traitement des données de durée de vie

Le tableau 10 présente un comparatif des méthodes de traitement des données de durée de vie des entités constructives présentées ci-dessus : les données qu'elles traitent, le(s) niveau(x) sur l'échelle géométrique des entités constructives au(x)quel(s) se rapportent ces méthodes, leurs avantages et limites.

Approche	Données utilisées	Echelle	Avantages	Limites
Approche fiabiliste	Données expérimentales obtenues selon des expositions sur le terrain, dans des bâtiments expérimentaux, de courte durée accélérée.	Matériau Produit Bâtiment	Possibilité de prendre en compte plusieurs paramètres aléatoires.	Nécessité d'une modélisation probabiliste des données.
Approche statistique	Tous types de données expérimentales.	Matériau Produit Bâtiment	Possibilité de prendre en compte plusieurs paramètres aléatoires.	Nécessité d'un grand nombre de données expérimentales.
Modèles de mécanisme de vieillissement	Données expérimentales obtenues selon des expositions sur le terrain, dans des bâtiments expérimentaux, de courte durée accélérée.	Matériau	Modélisation théorique du comportement des matériaux.	Plus le modèle est « fin » moins il est extrapolable à d'autres systèmes constructifs.

Dire d'expert	Tous types de données expérimentales.	Matériau Produit Bâtiment	Analyse rapide.	Résultats subjectifs.
Méthode des facteurs	Tous types de données expérimentales et élaborées (obtenues selon les autres approches).	Produit Bâtiment	D'application (en apparence) aisée.	Résultats subjectifs.
Fusion des données	Tous types de données expérimentales et élaborées (obtenues selon les autres approches).	Produit	Permet de combiner l'ensemble des données disponibles.	Nécessite une bonne connaissance des conditions d'obtention des données.

Tableau 10 : Comparatif des méthodes de traitement des données de durée de vie

II.3.3. Synthèse et analyse critique

Les différents types d'essais de vieillissement permettant d'obtenir des données expérimentales de durée de vie des matériaux, produits et bâtiments se distinguent par le temps d'exposition – qui influence directement le coût d'expérimentation – et les sollicitations – qui sont plus ou moins proches de la réalité et plus ou moins maîtrisées.

Les différentes méthodes de traitement des données expérimentales, permettant d'obtenir des données élaborées de durée de vie, se distinguent par :

- le type d'entité constructive (matériau, produit, bâtiment) étudié,
- le nombre et le type de données expérimentales nécessaires,
- le type d'approche (aléatoire, semi-déterministe, déterministe),
- le temps de traitement,
- la finesse et l'objectivité des résultats.

Cependant ces méthodes présentent une même limite, elles n'utilisent qu'un seul type d'entité constructive à la fois, c'est-à-dire qu'elles n'utilisent pas des données provenant de plusieurs niveaux de l'échelle géométrique.

Quels que soient les essais et méthodes utilisés, les données de durée de vie élaborées contiennent des erreurs, dues à leur acquisition – censure, incertitude – et à leur traitement – imprécision, incomplétude. Il serait utopique de vouloir définir un essai et une méthode de traitement qui permettent d'obtenir un résultat exempt d'erreur ; il est donc essentiel de pouvoir maîtriser la qualité des données de durées de vie, en l'évaluant.

II.4. Etat de l'art sur l'évaluation de la performance

L'objectif de ce mémoire de thèse est d'obtenir le profil multi-performance de tout produit de construction à tout instant de sa vie en œuvre ; cet objectif se rapporte à une thématique générale d'évaluation de la performance de ce produit. L'évaluation de la performance dans le domaine de la construction est incluse dans une approche globale, la « Performance-Based Building », qui est diffusée depuis 2001 par le réseau PeBBu – Performance Based Building Network (*cf.* II.4.1).

Des méthodes et méthodologies d'évaluation de la performance des entités constructives ont été développées aux niveaux des matériaux (*cf.* II.4.2), des produits (*cf.* II.4.3) et des bâtiments (*cf.* II.4.4) ; nous nous en inspirons pour le développement de notre propre étape d'analyse quantitative des performances de la méthodologie que nous proposons en deuxième partie de ce mémoire.

II.4.1. Approche « Performance-Based Building »

La définition de cette approche proposée par A. Lee [LEE, 03] est telle que « la performance-based building considère l'exigence de performance tout au long de la vie de conception du bâtiment et de ses produits, en termes compréhensibles par le maître d'ouvrage et les utilisateurs du bâtiment, et qu'elle puisse être objectivement vérifiée pour confirmer que les exigences ont été satisfaites. Les exigences concernent ce que le bâtiment ou le produit doit faire et non la manière dont il est construit ».

L'approche de performance-based building repose donc sur le concept suivant « la base de toutes les activités de la construction devrait être la performance d'un bâtiment en service plutôt que la prescription de la manière dont le bâtiment va être construit » [LEE, 03].
La performance-based building est actuellement véhiculée et prend de l'ampleur grâce au réseau PeBBu, qui est structuré en neuf domaines : 1 – Matériaux et produits, 2 – Air intérieur, 3 – Conception des bâtiments, 4 – Environnement construit, 5 – Organisation et gestion, 6 – Pratiques légales et courantes, 7 – Règlements du bâtiment, 8 – Innovation et 9 – Information et documentation. Le type d'approche / perspective et le champ d'application de chacun de ces neuf domaines sont présentés à la figure 14.

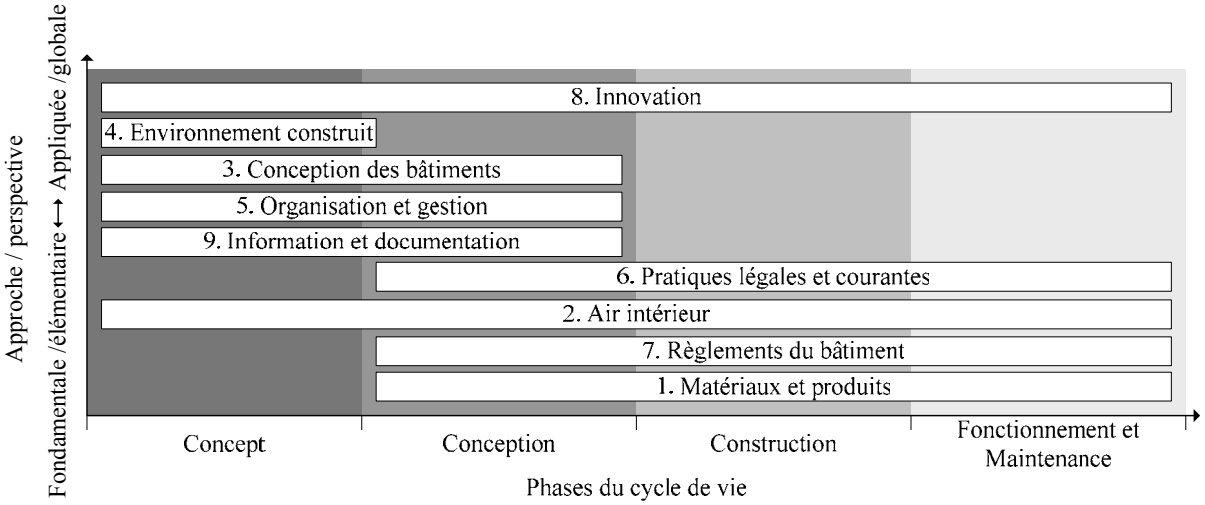


Figure 14 : Approche, perspective et champ d'application des domaines du réseau PeBBu [LEE, 03]

Ce concept, qui n'est pas nouveau comme en témoigne la norme internationale ISO 6241 de 1984 relative à l'évaluation de la performance dans le bâtiment [ISO, 84], est intégré dans les règlementations internationales en vigueur, telles que la Directive Produits de Construction (DPC), les guides de l'European Organisation for Technical Approvals (EOTA) et les Eurocodes.

II.4.2. Méthodologie d'évaluation de la performance des matériaux

La méthodologie d'évaluation de la durée de vie des matériaux, présentée au paragraphe II.3.2-c et schématisée à la figure 10, est basée sur le concept d'évaluation de la performance.

Il s'agit en effet, selon cette méthodologie, de définir le ou les critères de performance qui semblent a priori le mieux caractériser le comportement du matériau étudié et qui va(vont) être mesuré(s) lors des expérimentations.

II.4.3. Méthodes et méthodologie d'évaluation de la performance des produits

Méthodes : essais d'évaluation de la performance des produits

Les essais d'évaluation de la performance des produits consistent à expérimenter si ces produits sont capables de résister mécaniquement, physiquement et / ou chimiquement à des sollicitations pré-définies, c'est-à-dire que leur performance reste supérieure à un seuil fixé.

La performance étudiée selon ce type d'essai peut être la pérennité d'un produit à des sollicitations climatiques et d'usage spécifiques – on se ramène alors à la méthodologie présentée au paragraphe précédent, *cf.* II.4.2 – ou plus généralement la résistance mécanique à une ou des sollicitations qui endommagent le plus le produit considéré – ce qui correspond à la démarche de certification des produits.

Ces essais englobent les quatre phases – détaillées dans [CIB, 82] – suivantes :

- **définition** : analyse du contexte de l'étude, de la performance attendue, des critères de performances, des agents climatiques et d'usages déterminants,
- **préparation** : définition du protocole d'essais,
- **pré-tests** : validation du protocole d'essais sur des produits de performance connue,
- **réalisation de l'essai** : essai sur le produit à évaluer,
- **rapport** : analyse et interprétation des résultats obtenus.

Il existe de nombreuses normes définissant ces protocoles d'essais qui ont été développées afin d'harmoniser la performance des produits mis sur le marché européen ; par exemple la norme NF EN 356 [AFN, 00a] décrivant les essais de résistance des vitrages de sécurité à l'attaque manuelle, ou la norme NF EN 1365-1 [AFN, 00b] spécifiant les essais de résistance au feu des murs porteurs, ou encore la norme NF EN 1934 [AFN, 98b] expliquant l'essai d'évaluation de la performance thermique des maçonneries.

Méthodologie : Performance Limits Method (PLM)

La Performance Limits Méthod est une méthodologie d'évaluation de la performance des produits de construction développée par le département Building and Environment Sciences and Technology (BEST) du Politecnico di Milano [REC, 03b] et [IAC, 05].
La méthodologie développée comprend quatre étapes :

- étape 1 : définition de la performance à considérer – par exemple « contrôler la condensation superficielle » – du ou des critère(s) de performance permettant de mesurer cette performance – par exemple la température superficielle interne – des caractéristiques intrinsèques au produit dont dépend l'évolution de la performance – par exemple la conductivité thermique,
- étape 2 : recherche, dans la littérature (normes, études fondamentales et expérimentales), des modèles décrivant l'évolution des critères de performance en fonction des caractéristiques intrinsèques, puis obtention de l'évolution, pour chaque composant du produit, des critères de performance en fonction d'une dégradation (simulée) des caractéristiques intrinsèques,

- étape 3 : recherche dans les réglementations des valeurs limites des critères de performance (pour nous, les seuils de dysfonctionnement), puis détermination des valeurs des caractéristiques intrinsèques correspondant à ces valeurs limites,
- étape 4 : corrélation entre ces valeurs limites et les durées d'atteinte de ces limites – obtenues par essais de vieillissement en exposition de longue durée. La durée de vie du produit est alors égale au minimum de ces durées.

L'étape 2 vise, par utilisation des modèles associés à chaque composant, à obtenir une vision globale de la part de chaque composant dans la / ou la non satisfaction d'un critère de performance ; en effet, sur un même graphique, il est possible pour une même valeur de caractéristique intrinsèque, de visualiser les niveaux de critère de performance des différents composants. La figure 15 représente le résultat de la deuxième étape de la PLM pour un mur traditionnel italien composé d'un mortier intérieur (intonaco interno) de briques creuses (forati) de laine de verre (lana di vetro) de briques mi-pleines (semipieni) et de mortier extérieur (intonaco esterno).

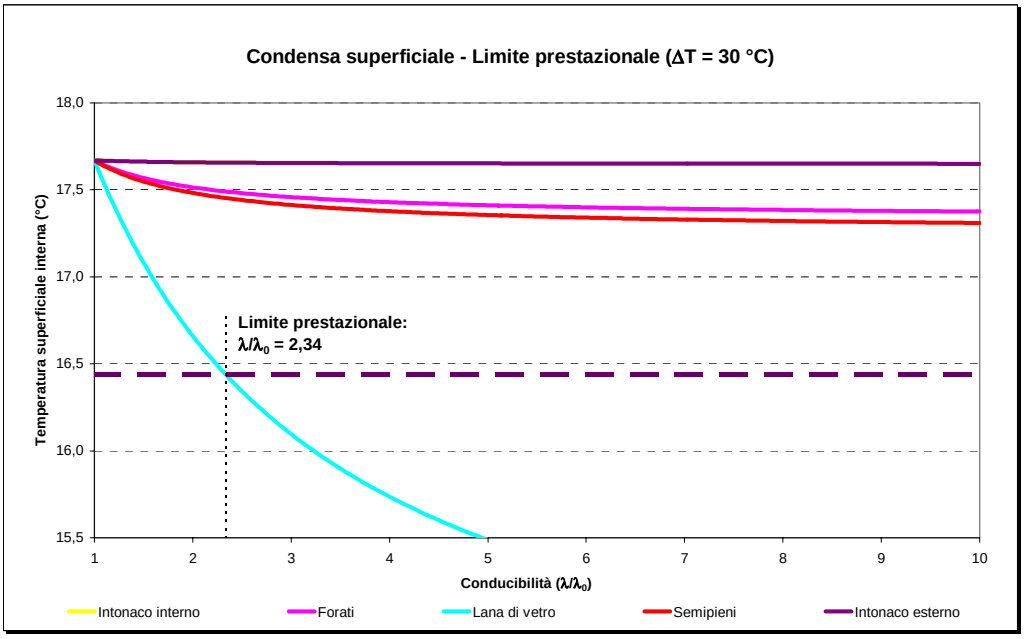


Figure 15 : Evolution de la température superficielle interne d'un mur traditionnel italien [IAC, 05]

Le protocole d'essais et les résultats des essais de vieillissement en exposition de longue durée correspondant au mur de la figure 15 sont détaillés dans [DAN, 03] et [DAN, 05].
Les résultats expérimentaux d'essais de longue durée demandant par définition du temps mais également des moyens conséquents, P. Iacono a proposé une autre utilisation de la PLM pour la comparaison de la performance des produits de construction [IAC, 05]. Il introduit deux indicateurs – I_1 et I_2 – de « propension à la durée de vie » définis ainsi :

$$I_1 = \frac{C_{\lim}}{C_0} \quad [8] \qquad\qquad I_2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta P_i}{\Delta P_{\max}} \quad [9]$$

Où :

- C : caractéristique intrinsèque, C_0 : caractéristique intrinsèque initiale, $C_{\lim}$: caractéristique intrinsèque correspondant à la défaillance,
- P : critère de performance, ΔP_i : contribution du composant i, $\Delta P_{\max}$: contribution du composant ayant le plus d'influence,
- n : nombre de composants.

La signification graphique de ces deux indicateurs est schématisée à la figure 16 :

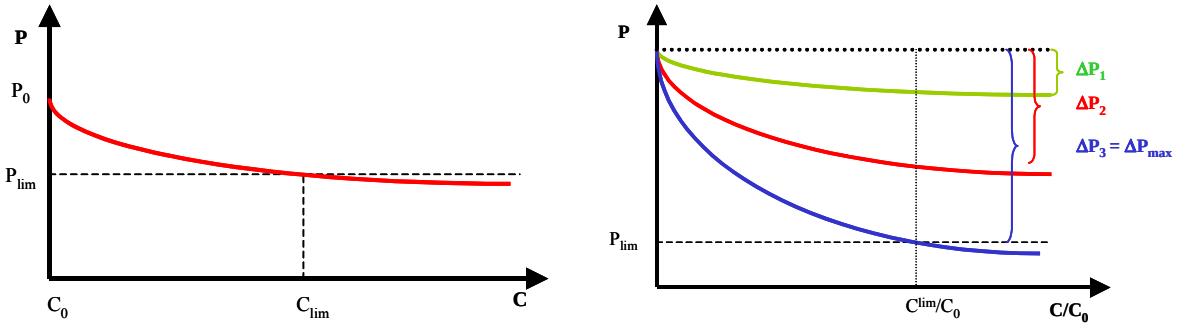


Figure 16 : Signification des deux indicateurs de « propension à la durée de vie » [IAC, 05]

La comparaison de deux produits *i* et *j* est réalisée suivant l'algorithme présenté à la figure 17 :

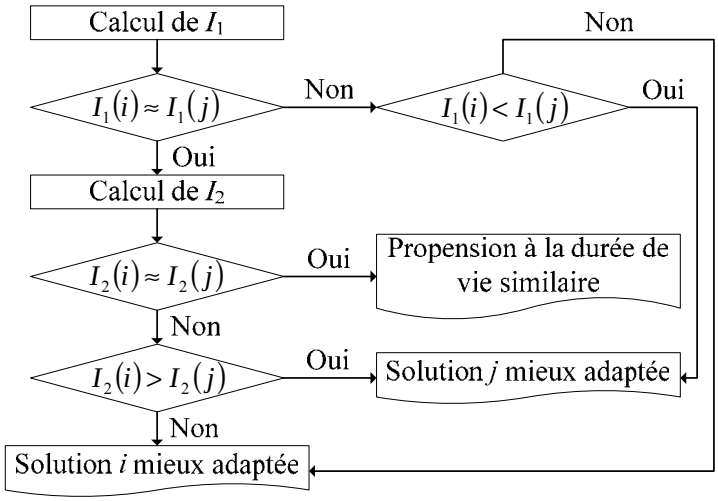


Figure 17 : Algorithme de comparaison de deux produits [IAC, 05]

La performance limits method a été appliquée, jusqu'à présent, uniquement à des problèmes hygro-thermiques, puisque ce sont les problèmes pour lesquels il existe le plus de modèles d'évolution des critères de performance.
Cette méthodologie ne prend pas en compte les interactions possibles entre composants, c'est-à-dire l'influence que peut avoir un assemblage de composant sur l'évolution des critères de performance.

II.4.4. Méthodologies d'évaluation de la performance des bâtiments

L'évaluation de la performance des bâtiments ou de parties de bâtiment, telles que des pièces, s'intéresse à leur capacité à assurer les six exigences essentielles définies dans la directive des produit de construction (1. résistance mécanique et stabilité, 2. sécurité en cas d'incendie, 3. hygiène, santé et environnement, 4. sécurité d'utilisation, 5. protection contre le bruit, 6. économie d'énergie et isolation thermique).
Il s'agit essentiellement d'étudier d'une part la résistance des structures sous sollicitations exceptionnelles / accidentelles, tels que les incendies, les séismes, les explosions, etc. et d'autre part la capacité des bâtiments à assurer un certain niveau de confort, tel que le confort acoustique, thermique, la qualité de l'air intérieur, etc.

Les recherches menées dans ce domaine consistent à développer des modèles, généralement des modèles numériques, les plus représentatifs possible de la réalité afin de pouvoir aider à la conception de bâtiments les plus respectueux possible des attentes des maîtres d'ouvrages et des utilisateurs. Nous pouvons citer par exemple, les recherches menées par D. JREIJIRY [JRE, 04] proposant d'utiliser l'outil SIMBAD (SIMulator of Buildings And Devices) et une bibliothèque de modèles d'HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) pour le contrôle de la ventilation dans les bâtiments, ou l'analyse du comportement de la structure et des systèmes anti-incendie du World Trade Center proposée par V. K. R. Kodur [KOD, 04] pour comprendre les mécanismes qui ont conduit à la ruine de cette tour et ainsi faire évoluer la conception des immeubles de grande hauteur vis-à-vis de l'incendie.

Dans le domaine des digues, D. Serre [SER, 05] a proposé une méthodologie d'évaluation des indicateurs de performance des digues. Cette méthodologie se décompose en trois étapes :

- recherche des liens existants entre les critères de performance (fonctions des digues) et les causes affectant ces critères (sollicitations environnementales : fortes crues, racines, gel-dégel, etc.) par analyse fonctionnelle puis analyse des modes de défaillances et de leurs effets,
- détermination des niveaux des critères de performance en fonction de « l'amplitude » des causes (par exemple, les « arbres » sont décomposés en « grand arbre », « petit arbre » et « buisson ») par consultation d'un panel d'experts en auscultation des digues,
- définition d'indicateurs de performance (informations permettant d'aider la gestion de la maintenance du parc de digues) par agrégation – moyenne pondérée ou affectation à base de règles – des critères de performance.

Les deux principales distinctions existantes entre le domaine des digues et le domaine du bâtiment sont que les digues constituent un long-linéaire semblable structurellement – alors que les produits de construction présentent une grande variabilité structurelle – et qu'il existe une connaissance experte disponible basée sur une longue expérience d'auscultation – alors que cette connaissance est difficilement accessible dans le domaine du bâtiment ; de ce fait les sollicitations en service et les effets de ces sollicitations sur le fonctionnement des digues sont connues. Malgré ces différences, ces travaux de thèse apportent trois possibilités de développement pertinentes pour notre recherche :

- l'utilisation d'indicateurs de performance englobant plusieurs critères de performance pour synthétiser les informations de niveaux de performance disponibles,
- la recherche d'un niveau de généricité structurelle et fonctionnelle des produits de construction,
- l'idée de composer un ou plusieurs panels d'experts pouvant identifier les liens entre amplitude des causes de dégradation et niveau des critères de performance.

II.4.5. Synthèse et analyse critique

L'évaluation de la performance des produits de construction, au sens de l'approche performance-based building, consiste à étudier les niveaux des critères de performance de ces produits en service vis-à-vis des attentes des utilisateurs et non vis-à-vis de la manière dont ils doivent être construits.

Les méthodes et méthodologies d'évaluation de la performance existantes, aux niveaux des matériaux, des produits et des bâtiments, ont une même limite : elles cherchent à étudier un ou un ensemble de critère(s) de performance relatif(s) à une même préoccupation, par exemple la résistance à une sollicitation exceptionnelle / accidentelle, le confort thermique, etc. L'approche proposée par D. Serre s'apparente à ce que nous souhaitons développer : une méthodologie applicable à tout produit de construction permettant d'avoir une vision globale à tout instant de la vie en service d'un produit des niveaux de l'ensemble des critères de performance relatifs aux attentes des utilisateurs vis-à-vis de ce produit.

Synthèse : problématique choisie

La problématique que nous défendons dans ce mémoire de thèse est de connaître l'évolution du profil multi-performance dans le temps de tout produit de construction en service et de développer un outil méthodologique d'évaluation de cette performance, afin de pouvoir aider à la conception et à l'inspection – maintenance – réparation de ces produits. Cette problématique générale se décompose en plusieurs « sous-problématiques » :

Modélisation systémique des produits de construction
Nous nous intéressons au comportement des produits considérés dans leur environnement en service – conditions climatiques et d'usage – et aux dégradations engendrées par leur processus de construction.

Modélisation multi-échelle
Afin de mieux rendre compte des préoccupations du contexte de la construction, nous modélisons les systèmes constructifs (entités constructive et leur environnement) à l'aide de quatre échelles : échelle géométrique, échelle phénoménologique, échelle fonctionnelle, et échelle temporelle.

Connaissance des scénarii de dégradation
Dans l'optique d'avoir une vision progressive et non binaire de la défaillance des produits de construction nous recherchons les enchaînements de dégradations (scénarii) conduisant aux dysfonctionnements des fonctions assurées par ces produits puis à la défaillance elle-même ; en nous basant sur la méthode d'analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE).

Prise en compte par hiérarchisation de la criticité des scénarii
Notre approche de la connaissance des scénarii de dégradation consiste à identifier l'ensemble des scénarii afin de ne pas omettre de scénarii critiques, puis nous cherchons à hiérarchiser les scénarii par ordre de criticité afin de restreindre nos études de cas – et par conséquent les moyens nécessaires à de telles études – uniquement aux scénarii les plus critiques, c'est-à-dire à ceux qui seront effectivement pris en compte lors des phases de conception et d'inspection – maintenance – réparation.

Utilisation et gestion de données multi-sources et multi-échelles
Notre approche consiste à utiliser l'ensemble des données phénoménologiques, temporelles et des données liées à l'évaluation des critères de performance disponibles, afin de ne pas être bloqué par un manque de données relevant parfaitement de nos cas d'étude. De ce fait, ces données proviennent de diverses sources et sont associées à différents niveaux de notre modélisation multi-échelle. Par conséquent, la méthodologie que nous proposons intègre des méthodes d'évaluation de la qualité des données – de leur incertitude, imprécision et incomplétude – d'unification et d'agrégation des données.

Partie B

Méthodologie d'évaluation du profil multi-performance

Introduction générale aux propositions

Chapitre I : Proposition de méthodes

Chapitre II : Proposition de bases de données

Chapitre III : Proposition d'outils de représentation

Chapitre IV : Proposition d'une méthodologie

Chapitre V : Perspectives aux propositions

Synthèse générale des propositions

Introduction générale aux propositions

Objectifs et difficultés de la méthodologie

Dans cette deuxième partie nous présentons une approche de la prévision de l'évolution des performances d'un produit de construction dans le temps dans un contexte multi-échelle : géométrique, phénoménologique, fonctionnelle et temporelle.

Cette approche possède deux objectifs :

- le premier est celui de la construction et du suivi du profil multi-performance d'un produit,
- le second est celui de la capitalisation des informations environnementales, fonctionnelles, phénoménologiques, de probabilité d'apparition et de performance recueillies et générées à partir d'études de cas.

Cette approche méthodologique est construite à partir d'une analyse des données à prendre en compte et des outils et méthodes disponibles ou manquants. Plus pratiquement, pour nous, une méthodologie est l'enchaînement de l'utilisation de méthodes, de bases de données et d'outils de représentation. Lorsque ces méthodes et outils de représentation existent et qu'ils ne coïncident pas complètement avec notre approche nous devons alors les adapter ou les créer.

Les données sont relatives :

- aux agents environnementaux présents dans l'environnement du produit (air, eau, vent, chocs,…),
- aux fonctions assurées par celui-ci (résister mécaniquement pour un mur porteur, être transparent pour un vitrage,…),
- à l'évolution dans le temps des phénomènes ou des scénarii pouvant dégrader le produit, à leur délai de réalisation et à leur probabilité d'apparition,
- aux niveaux de performances réels et attendus pour les fonctions du produit.

Ces données peuvent provenir de différentes sources : études fondamentales, études expérimentales, dires d'expert, retours d'expérience.

Les outils et méthodes, détaillés en première partie de ce mémoire, appartiennent aux familles de la modélisation systémique, de l'analyse des défaillances, de l'analyse des risques, de l'analyse multicritère, de la caractérisation, de la modélisation et du traitement des données.

Contexte multi-échelles de la méthodologie

Notre démarche d'évaluation de la performance repose sur une exploitation de l'ensemble des informations, spécifiques au domaine du produit, dont nous disposons. Or ces informations ne sont pas forcément obtenues à l'échelle souhaitée. Pour pouvoir les formaliser, nous proposons un espace des évaluations (EE) constitué de quatre axes : géométrique, phénoménologique, fonctionnel et temporel.

Points de l'espace des évaluations (cf. figure 18)

Pour une étude donnée, on définit un point objectif (PO) c'est-à-dire le point de l' EE où l'on veut obtenir une évaluation. Cette évaluation pourra concerner la problématique :

- de détermination de la durée d'un scénario (I.3 et IV.2),
- de hiérarchisation des scénarii les plus critiques (I.4 et IV.3),
- d'obtention des niveaux de performance d'un produit (I.5 et IV.4).

Ce *PO* est localisé dans l'*EE* par un quadruplet {niveau géométrique, niveau phénoménologique, niveau fonctionnel, date}. L'évaluation en ce *PO* est obtenue à partir d'évaluations en d'autres points de l'*EE*, que nous nommons points d'évaluation (*PE*), où des informations sont disponibles.

Afin de définir la position relative des *PE* par rapport au *PO* dans l'*EE*, nous introduisons les notions de point inférieur (*PI*) et de point supérieur (*PS*) :

- un *PI* est un *PE* dont tous les niveaux sont inférieurs ou égaux à ceux du *PO* avec au moins un niveau strictement inférieur ;
- un *PS* est un *PE* dont tous les niveaux sont supérieurs ou égaux à ceux du *PO* avec au moins un niveau strictement supérieur.

Un exemple graphique du positionnement de ces trois types de points (*PO*, *PI* et *PS*) dans l'espace des évaluations est présenté à la figure 18 :

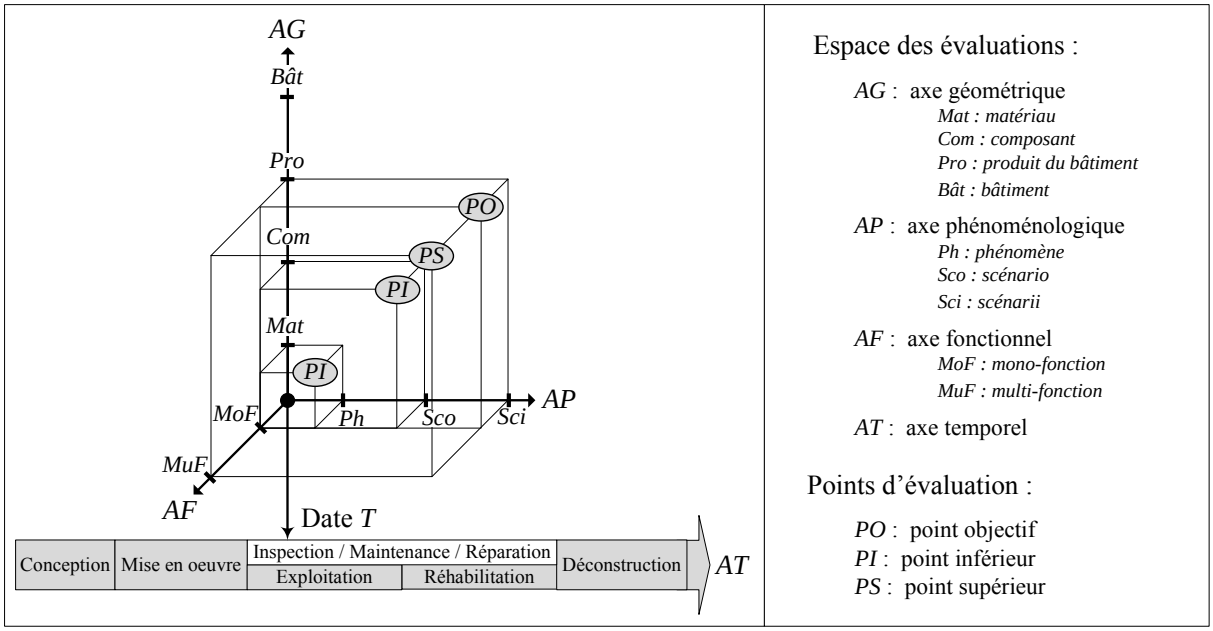


Figure 18 : Illustration d'emplacements de points d'évaluation dans l'espace des évaluations

Sur chacun des quatre axes de l'espace des évaluations est portée une échelle constituée de plusieurs niveaux ; nous nommons gradation la distance séparant deux niveaux successifs de ces échelles.

Notion de référentiel de l'étude

Dans la pratique, les informations disponibles en ces points d'évaluation sont différentes de ce que l'on souhaite obtenir. Nous introduisons alors la notion de référentiel de l'étude qui permet de définir, selon l'étape de la méthodologie, l'échelle à laquelle on souhaite réaliser l'étude et les objets que l'on souhaite étudier (entité géométrique, entité phénoménologique, entité fonctionnelle, nature et intensité des sollicitations environnementales).
Selon l'étape de la méthodologie considérée, nous ne cherchons pas à étudier les mêmes objets, par conséquent les éléments permettant de caractériser les référentiels de l'étude sont eux aussi différents ; ils sont présentés dans le tableau 11.

Eléments à renseigner / Etape	Point d'évaluation (*PE*)	Entité géométrique	Entité phénoménologique	Entité fonctionnelle	Nature et intensité des sollicitations environnementales
Analyse temporelle	✓	✓	✓		✓
Analyse de la criticité	✓	✓	✓		✓
Analyse des performances	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 11 : Renseignements pour caractériser un référentiel de l'étude selon l'étape de la méthodologie menée

Un exemple de référentiel de l'étude, le phénomène de durcissement d'un joint butyle, associé à l'étape d'analyse temporelle est présenté dans le tableau 12.

Etape de la méthodologie : analyse temporelle					
Point d'évaluation	{matériau, phénomène, mono-fonction, date inconnue}				
Entité géométrique	Joint butyle				
Entité phénoménologique	Durcissement				
Nature et intensité des sollicitations environnementales	Nature :	Oxygène ;	U.V. ;	Température élevée ;	Ozone
	Intensité :	Normale ;	Normale ;	Normale ;	Normale

Tableau 12 : Exemple de référentiel de l'étude – phénomène de durcissement d'un joint butyle

Grandes étapes de la méthodologie

Nous présentons brièvement le principe de cette méthodologie, sachant qu'elle sera détaillée dans le quatrième chapitre de cette partie. Elle est décomposée en cinq étapes :

- analyse qualitative, notée *AQL*,
- analyse quantitative temporelle, notée *AQT*,
- analyse quantitative de la criticité, notée *AQC*,
- analyse quantitative des performances, notée *AQP*,
- présentation des résultats.

L'analyse qualitative correspond à la recherche exhaustive des scénarii de dégradation d'un produit lors de sa phase d'exploitation et leur caractérisation (causes, composants et fonctions associés, conséquences). Elle est basée sur la connaissance du modèle fonctionnel du produit ; celui-ci est bâti par la réalisation successive d'une analyse structurelle (définition de la structure du produit et de son environnement), d'une analyse fonctionnelle (identification des fonctions assurées par le produit et ses composants) et d'une analyse du processus (détermination des étapes du processus de construction et de leurs influences sur le fonctionnement du produit en exploitation).

L'analyse quantitative temporelle correspond à une quantification temporelle des scénarii obtenus précédemment. Elle est réalisée à partir des données d'évolution des mécanismes de dégradation et des probabilités d'apparition provenant de différentes sources et obtenues en différents points d'évaluation (*PE*). L'analyse quantitative temporelle comporte l'évaluation de la durée et de la probabilité d'apparition des phénomènes suivie de l'évaluation des durées des scénarii indépendants. Ces deux évaluations soulèvent des difficultés liées à la collecte des données, à leur transformation, à leur traitement (unification et agrégation) ainsi qu'à la gestion des interactions entre scénarii. Le passage du niveau du phénomène à celui du scénario sera conditionné par la connaissance des taux de transition entre phénomènes.

A l'issue de l'analyse quantitative temporelle, nous disposons des durées et des probabilités d'apparition de l'ensemble des scénarii, que ce soient les scénarii les plus critiques ou ceux qui présentent le moins de risque. **L'analyse quantitative de la criticité** permet alors de

réduire le nombre des scénarii à considérer pour la suite de l'étude aux seuls scénarii les plus critiques. Elle comprend deux phases : l'évaluation de la gravité d'un scénario (mesure de l'impact de ses conséquences sur l'aptitude du produit à satisfaire les six exigences essentielles fixées par la directive des produits de construction) puis classement et hiérarchisation des scénarii par ordre de criticité (combinaison de la probabilité d'apparition d'un scénario, de sa durée et de sa gravité).

L'analyse quantitative des performances permet d'intégrer l'échelle fonctionnelle dans l'approche tridimensionnelle {géométrique, phénoménologique, temporelle} considérée jusqu'alors. La corrélation entre l'état de dégradation et le niveau de performance de chaque fonction permet d'évaluer le niveau de performance d'une fonction à chaque instant de l'axe temporel. Considérant les fonctions indépendamment mais également les combinaisons de fonctions, nous obtenons l'évaluation des niveaux de performance multifonctionnels. Cette analyse aboutit à la création du profil multi-performance – vision globale à un instant donné des niveaux de performance de l'ensemble des fonctions d'un produit – et à son exploitation : prise en compte de l'évolution de ces niveaux au cours du temps, pour une aide à la conception et une aide à la décision d'Inspection Maintenance Réparation.

La présentation des résultats est une synthèse graphique et aisément exploitable des résultats obtenus par les quatre analyses précédentes : les scénarii de dégradation les plus critiques et leurs interactions sont représentés par le graphe événementiel des défaillances et l'arbre des défaillances, et les profils multi-performances sont présentés par des représentations radar.

Structuration des propositions

La structuration des méthodes, des bases de données et des outils de représentation autour de la méthodologie proposée, ainsi que les renvois aux paragraphes détaillant ces propositions sont présentés à la figure 19.

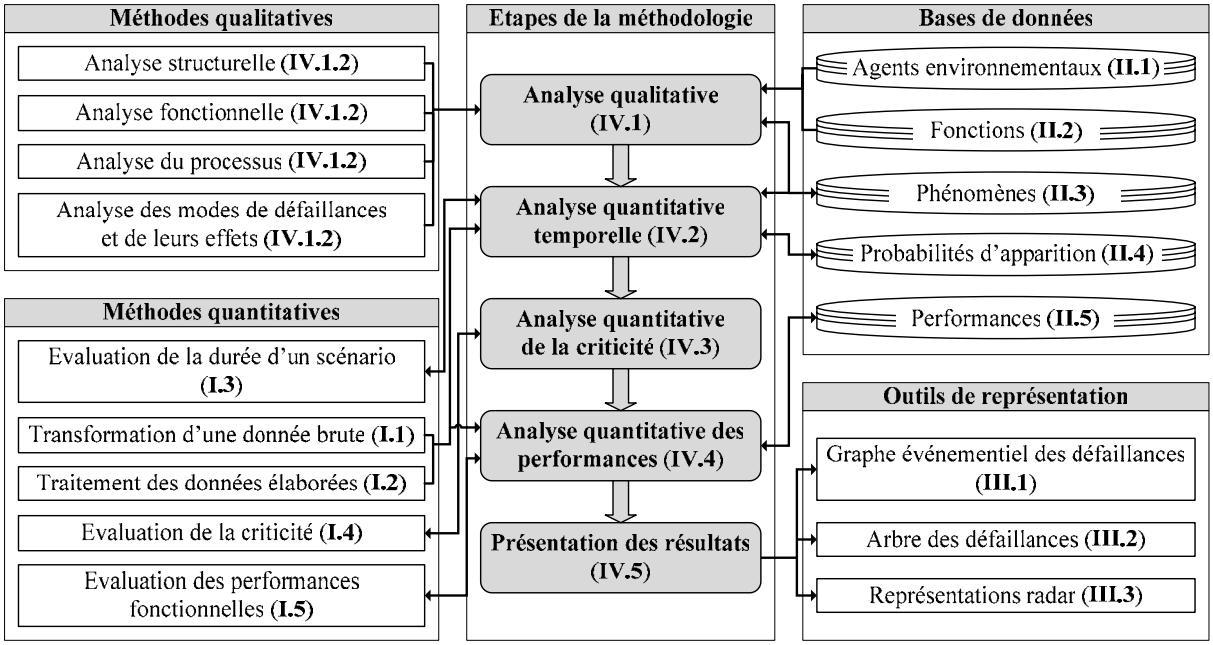


Figure 19 : Structuration des propositions

Organisation des propositions dans le mémoire

a) Analyses quantitatives

Nous avons choisi de regrouper dans le premier chapitre de cette partie les cinq familles de méthodes, bagage commun, que nous utiliserons dans les trois analyses quantitatives à mener.

b) Thésaurisation

Nous présentons dans le deuxième chapitre de cette partie les bases de données que nous avons créées pour répondre à notre second objectif de capitalisation de l'ensemble des informations recueillies et générées lors de la réalisation de cas d'étude.

c) Représentation des résultats

Nous proposons un ensemble d'outil de représentation des résultats obtenus dans le troisième chapitre de cette partie dans la mesure où les résultats sont pertinents uniquement s'ils peuvent être compris et exploiter par les utilisateurs de la méthodologie.

d) Méthodologie

Le quatrième chapitre est alors consacré à la méthodologie que nous proposons pour évaluer le profil multi-performance des produits de construction ; elle correspond à l'enchaînement de l'utilisation des méthodes (qualitatives et quantitatives), bases de données et outils de représentation.

e) Limites et perspectives

Le cinquième chapitre est consacré aux limites et aux perspectives des propositions présentées dans les quatre premiers chapitres.

Remarques : nous intégrons les méthodes qualitatives dans le chapitre méthodologie, nous ne leur dédions donc pas un chapitre spécifique, dans la mesure où les modifications apportées aux méthodes existantes ne constituent pas le cœur des travaux de recherche proposés dans ce mémoire.

Les hypothèses qui sont formulées dans cette partie sont discutées au paragraphe « analyse critique » de la partie C.

Chapitre I : Propositions de méthodes

Introduction aux méthodes

Dans les sous paragraphes suivants nous proposons cinq méthodes qui sont utilisées à plusieurs reprises dans la méthodologie globale. Ces méthodes peuvent être appréhendées partiellement indépendamment les unes des autres. C'est donc dans un souci de non redondance, de visualisation des apports scientifiques communs aux différentes étapes de la méthodologie, de clarté de présentation de l'enchaînement de ces étapes que nous optons pour la description de ces méthodes avant celle de la méthodologie elle-même. Il s'agit :

- de la méthode de transformation d'une donnée brute (*cf.* I.1),
- de la méthode de traitement des données élaborées (*cf.* I.2),
- de la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario (*cf.* I.3),
- de la méthode d'évaluation de la criticité (*cf.* I.4),
- de la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles (*cf.* I.5).

Afin de plus facilement comprendre le principe et l'utilisation de chaque méthode dans la méthodologie proposée, nous regrouperons dans un encadré au début de la présentation de chacune d'elles :

- les données en entrée de cette méthode,
- les données en sortie de cette méthode,
- le positionnement de ces données (entrantes et sortantes) dans l'espace des évaluations,
- les étapes de la méthodologie dans lesquelles cette méthode est utilisée.

I.1. Méthode de transformation d'une donnée brute

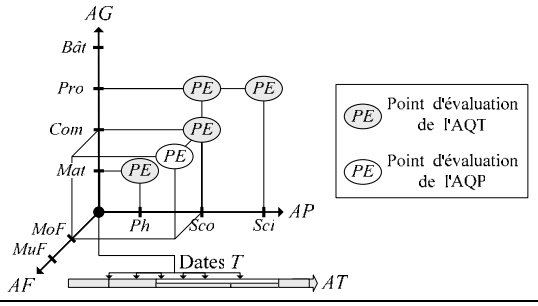
Donnée entrante	Donnée sortante	Positionnement dans l' *EE*	Etape de la méthodologie
Donnée brute	Donnée élaborée		*AQT* (analyse quantitative temporelle) *AQP* (analyse quantitative des performances)

Tableau 13 : Encadré de la méthode de transformation d'une donnée brute

Notations :

Nous rappelons les notations utilisées dans ce chapitre communes aux différentes méthodes :

- X , Y , T : trois variables et x , y , t leur réalisation, où T est la variable de temps,
- $\overline{X}$, $\overline{Y}$, $\overline{x}$ et $\overline{y}$: les normes de X , de Y et de leur réalisation,
- D_{brute} et $D_{élab}$: donnée brute et donnée élaborée,
- η : état de dégradation,
- ξ : probabilité d'apparition,
- κ : caractéristique intrinsèque,
- μ : niveau de performance.

Les notations plus spécifiques à la méthode de transformation d'une donnée brute sont :

- $M(X)$: modèle tel que $Y = M(X)$,
- $M_{norm}(\overline{X})$: modèle normalisé tel que $\overline{Y} = M_{norm}(\overline{X})$,
- $g_{ap}(X)$: fonction d'appartenance de X (théorie des sous-ensembles flous).

Principe

Une donnée brute est définie par sa nature, des variables X et Y, et son format, c'est-à-dire un modèle et les paramètres de ce modèle. Par exemple, dans le cadre de l'analyse quantitative temporelle, une donnée brute peut être définie par :

- ses variables : état de dégradation et temps,
- son modèle : fonction de Weibull standard,
- ses paramètres : α et β (échelle et forme).

Les données brutes ont des natures et des formats différents ; or les pratiques d'unification et d'agrégation des données (méthodes de traitement des données) nécessitent souvent de travailler sur des données normalisées ; par conséquent, nous proposons une méthode permettant d'obtenir une donnée élaborée à partir d'une donnée brute dont le modèle n'est pas connu et / ou n'est pas normalisé.

Pour une donnée brute, la méthode de transformation consiste à choisir le modèle le plus approprié, puis à en déduire le modèle normalisé. Le principe de cette méthode peut être schématisé de la façon suivante :

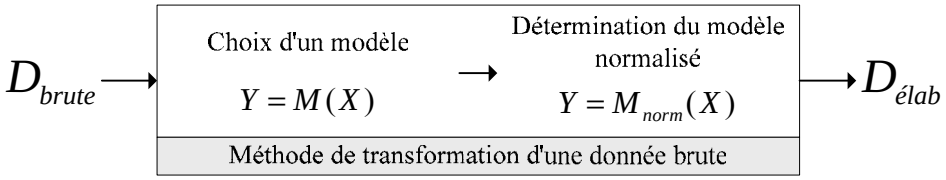


Figure 20 : Principe de la méthode de transformation d'une donnée brute

Remarque : notre objectif n'est pas de nous substituer à des études expérimentales ou théoriques permettant d'obtenir les données brutes elles-mêmes.

Utilisation dans la méthodologie

L'application de cette méthode est indépendante de l'emplacement de la donnée brute dans l'espace des évaluations ; nous n'intégrons donc pas cette problématique.
Cette méthode de transformation sera appliquée au cours de la méthodologie dès que l'on collectera des données brutes ; il pourra s'agir :

- de données d'état de dégradation (*AQT*),
- de données de probabilité d'apparition des scénarii (*AQT*),
- de données de caractéristiques intrinsèques et de niveaux de performance (*AQP*).

Cette méthode de transformation des données brutes est indispensable pour l'application de la méthodologie que nous proposons, mais nous ne faisons qu'appliquer des méthodes existantes à notre problématique ; de plus, cette méthode ne constitue pas le cœur de nos propositions, c'est la raison pour laquelle nous ne la détaillons pas ici, mais elle est présentée en annexe 5.

A l'issue de la méthode de transformation d'une donnée brute :

- l'état de dégradation η varie sur une échelle normalisée ([0 ;1]) croissante (la valeur « 0 » correspond à un état de dégradation minimal et « 1 » à un état de dégradation maximal),
- la probabilité d'apparition ξ varie sur [0 ; 1] croissante,
- la caractéristique intrinsèque κ varie sur [0 ; 1] décroissante,
- le niveau de performance μ varie sur [0 ; 1] décroissante.

I.2. Méthode de traitement des données élaborées

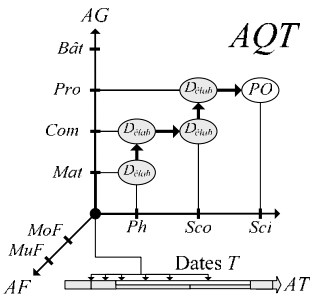
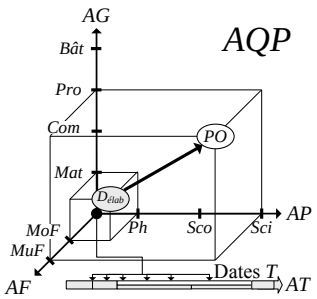
Données entrantes	Données sortantes	Positionnement dans l'*EE*	Etape de la méthodologie
Données élaborées	Données consensuelles	**Unification** L'unification de données élaborées multi-sources peut être menée en tout *PE* de l'*EE*. Les *PE* pour les *AQT* et *AQP* sont identiques à ceux du tableau 13. **Agrégation**  	*AQT* (analyse quantitative temporelle) *AQP* (analyse quantitative des performances)

Tableau 14 : Encadré de la méthode de traitement des données élaborées

Nous proposons une méthode de traitement des données élaborées que nous utilisons dans les analyses quantitatives de notre méthodologie afin de prendre en compte leur « imperfection ». L'imperfection des données élaborées signifie qu'elles sont incertaines, imprécises et / ou incomplètes :

- l'incertitude décrit la variabilité intrinsèque de la donnée,
- l'imprécision traduit les « défauts » de sa modélisation,
- l'incomplétude correspond au manque partiel ou total de données.

Pour simplifier, nous nommerons l'imperfection des données : « l'erreur des données ».

Nous présentons dans un premier paragraphe (I.2.1) l'analyse de cette erreur et les approches existantes de traitement de l'incertain et de l'imprécis qui servent de bases à notre proposition d'une méthode de traitement des données élaborées, détaillée aux I.2.2 et I.2.3.

I.2.1. Analyse de l'erreur des données élaborées et approches existantes

Analyse de l'erreur des données élaborées

L'erreur des données élaborées peut avoir trois origines :

a) l'erreur allouée aux données brutes,
b) l'erreur introduite par la transformation en données élaborées,
c) l'erreur générée par la méthode de traitement des données élaborées.

a) Erreur allouée aux données brutes

L'erreur allouée aux données brutes est liée à quatre facteurs décrits ci-dessous.

Fiabilité de la procédure d'obtention des données brutes

Elle peut se décliner en trois interrogations :

- la méthode adoptée était-elle pertinente vis-à-vis de l'objectif visé ?
- les hypothèses de modélisation sont-elles nombreuses ? Ces hypothèses sont-elles très restrictives ?
- quelle était la qualité des informations utilisées pour obtenir ces données ?

Fiabilité de la source des données brutes

Elle correspond à la confiance que l'on peut accorder à cette information au regard du niveau de référence de la source.

Censure des données

Dans toute procédure d'obtention des données il existe une part d'incertitude liée à la notion de censure. La censure des données est due à la limitation de la durée d'observation et au fait que cette observation est discrète. Dans le contexte de la construction, il semble en effet non réalisable d'attendre la réalisation de toutes les dégradations d'un ou d'un ensemble d'ouvrage(s) et de l'inspecter en continu pour pouvoir proposer des modèles de prévision des dégradations.

D'après [COU, 97], [BAC, 98], [REC, 04] et [MUR, 04], on distingue trois types de censure :

- la censure de type I : la durée d'observation est fixée, c'est le nombre des réalisations observées pendant cette durée qui est variable,
- la censure de type II : le nombre des réalisations observées est fixé à l'avance, c'est la durée permettant d'observer ce nombre de réalisations qui est variable,
- la censure aléatoire : si les observations sont effectuées à plusieurs dates, c'est la durée entre les dates d'observation qui est aléatoire.

Pour chacun de ces types de censure, trois cas se présentent :

- la censure à droite : la date de réalisation est inconnue puisqu'elle est postérieure à la durée d'observation ou à la dernière date d'observation,
- la censure à gauche : la date de réalisation est inconnue puisqu'elle est antérieure à la durée d'observation ou à la première date d'observation,
- la censure par intervalle : la date de réalisation est inconnue puisqu'elle est comprise entre deux dates d'observations. L'intervalle de censure sera borné par les dates d'observations juste antérieure et juste postérieure.

Incomplétude des données

Les données brutes utilisées pour nos trois analyses quantitatives sont nécessairement incomplètes du fait du nombre important d'organismes travaillant ou ayant travaillé sur ces thématiques et du temps nécessaire à la collecte de ces données.
Il paraît donc irréaliste de considérer que nous disposons de l'ensemble des données disponibles. De plus, il est inconcevable que tous les mécanismes de dégradation relatifs à tous les produits de construction, pour tous les niveaux des échelles géométrique, phénoménologique, fonctionnelle et temporelle, sous toutes les combinaisons de sollicitations aient été étudiés.

b) Erreur introduite par la transformation en données élaborées

Les données élaborées peuvent également être entachées d'erreur, du fait de la méthode de transformation présentée précédemment (*cf.* I.1). Les causes de cette erreur sont :

- le choix inapproprié du modèle,
- l'estimation biaisée des paramètres de ce modèle,
- le choix incorrect des bornes de normalisation.

c) Erreur générée par la méthode de traitement des données élaborées

Notre démarche de traitement des données (*cf.* I.2.2 et I.2.3) vise à exploiter l'ensemble des données élaborées disponibles. Par conséquent l'incertitude et l'imprécision de cette méthode sont liées à la compatibilité de ces données avec le référentiel de l'étude.

Approches existantes de traitement de l'incertain et de l'imprécis

Depuis les années soixante, plusieurs théories ont été développées afin de traiter les connaissances entachées d'incertitude et d'imprécision :

a) la théorie de l'évidence,
b) la théorie des sous-ensembles flous,
c) la théorie des possibilités.

a) Théorie de l'évidence

La théorie de l'évidence proposée par Dempster en 1967 [DEM, 67] fut reprise sous un formalisme mathématiquement plus abouti par Shafer en 1976 [SHA, 76]. Elle est également dénommée « théorie des croyances », « théorie des plausibilités » et « théorie de Dempster-Shafer ». Cette théorie est souvent décrite comme une généralisation de l'inférence bayésienne au traitement de l'incertain, en ce sens qu'elle permet de manipuler des événements non nécessairement exclusifs. Par conséquent elle prend en compte ce qui reste inconnu et représente parfaitement ce qui est déjà connu [JAN, 97].

b) Théorie des sous-ensembles flous

La théorie des sous-ensembles flous introduite par L. Zadeh en 1965 [ZAD, 65] et reprise par D. Dubois et H. Prade en 1980 [DUB, 80], permet de modéliser des connaissances imprécises (par exemple une approximation d'une valeur numérique, comme « à peu près 3,80 m ») ou vagues (par exemple une description exprimée en langage naturel, comme « haut »). Elle permet également de traiter dans un même cadre des connaissances fournies numériquement, par des instruments de mesure, et des connaissances exprimées symboliquement, par un observateur humain par exemple.
Elle ne permet cependant pas de manipuler dans un même formalisme des imprécisions et des incertitudes [BOU, 03].

c) Théorie des possibilités

La théorie des possibilités développée par L. Zadeh en 1978 [ZAD, 78] puis D. Dubois et H. Prade en 1988 [DUB, 88], est liée à la théorie des sous-ensembles flous, pour permettre de raisonner sur des connaissances imprécises ou vagues, en introduisant un moyen de prendre en compte des incertitudes sur ces connaissances [BOU, 95].

I.2.2. Notations, principe et utilisation de la méthode de traitement des données élaborées

Notations

Le vocabulaire et les notations associées, pour certaines empruntées aux théories de l'évidence, des sous-ensembles flous ou des possibilités, que nous utiliserons dans cette méthode de traitement des données élaborées sont les suivants :

- Θ : cadre de discernement, il représente le plus grand intervalle des valeurs prises par les données élaborées à fusionner (par exemple, Θ = [0 ; 1] dans le cadre de l'analyse des performances),
- m_c, $f_{mc}(x)$: masse de croyance et fonction de masse de croyance. La masse de croyance évaluée sur [0 ; 1] traduit la confiance que l'on a dans une donnée,
- CE_r, pCE_r : critère *r* d'évaluation de la qualité des données et poids associé,
- H_l, H_{R_l} et H_Θ : entropie propre de la donnée *l*, entropie relative de la données *l* et entropie du cadre de discernement.
- $\mathcal{S}_l$, $\mathcal{R}_l$ et θ : trois sous-ensemble de Θ, où $\mathcal{S}_l$ représente un sous-ensemble à fusionner, $\mathcal{R}_l$ un sous-ensemble résultant de la fusion et θ un sous-ensemble quelconque,
- P_l : preuve *l*, qui pointe sur un sous-ensemble $\mathcal{S}_l$ de Θ, par exemple $\mathcal{S}_l = \eta = [0{,}3\,;\,0{,}5]$. Dans notre contexte, une preuve est toujours une donnée élaborée,
- le conflit qui traduit la non intersection de deux sous-ensembles de Θ,
- la cohérence, duale du conflit, qui exprime l'intersection non vide de deux sous-ensembles de Θ,
- l'ignorance qui traduit la non connaissance de Θ par les preuves considérées,
- $C_f(\theta)$: consensus de θ, qui reflète le degré d'accord entre les preuves considérées. Le consensus est égal à 1 lorsque les preuves sont concordantes et inférieur à 1 lorsque les preuves sont conflictuelles,
- $Bel(\theta)$: croyance en θ, totalise toutes les raisons de soutenir θ,
- $Pl(\theta)$: plausibilité de θ, exprime l'intensité avec laquelle on devrait soutenir θ,
- $P(\theta)$: probabilité de Smets de θ, telle que $Bel(\theta) \leq P(\theta) \leq Pl(\theta)$,
- $Ind(\theta)$: indicateurs de qualité du domaine de valeurs θ, avec $Ind(\theta)$ = { $Bel(\theta)$; $P(\theta)$; $Pl(\theta)$ }.

Principe

Dans notre contexte d'incertitude et d'imprécision des données disponibles, nous proposons une méthode de traitement des données élaborées qui prenne en compte ces notions, basée sur les théories décrites précédemment (I.2.1).
Nous proposons de gérer l'incomplétude des données d'une part en exploitant l'ensemble des données élaborées disponibles et d'autre part en capitalisant ces données dans trois bases de données (phénomènes, II.3, probabilités d'apparition, II.4, et performances, II.5) utilisées par les trois analyses quantitatives.
La méthode de traitement des données proposée permet d'obtenir une donnée consensuelle et ses indicateurs de qualité par exploitation de l'ensemble des données élaborées disponibles à différents points d'évaluations (*PE*) de l'espace des évaluations ($\mathcal{EE}$). Pour nous, une donnée consensuelle est une donnée qui regroupe le maximum de consensus.

Le traitement des données est mené soit par :

- **unification**, lorsque les données élaborées utilisées pour obtenir une évaluation en un point objectif (*PO*) sont relatives à ce même point d'évaluation,
- **agrégation**, lorsque les données élaborées utilisées pour obtenir une évaluation en un point objectif (*PO*) sont relatives à des points inférieurs (*PI*),

Le principe de cette méthode est présenté à la figure 21.

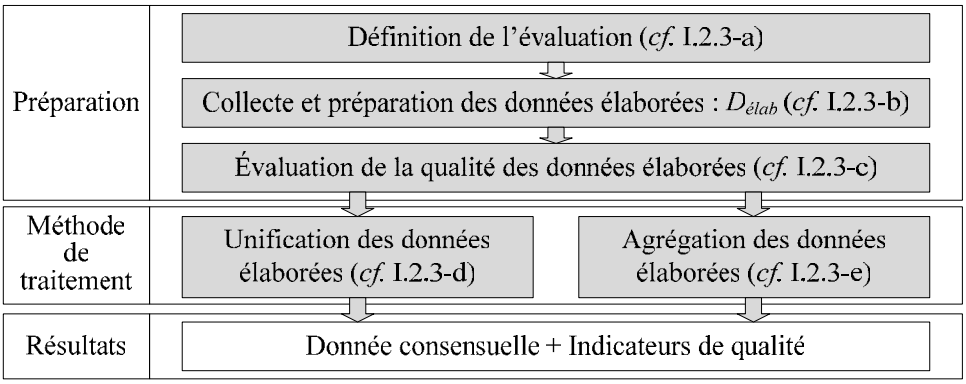


Figure 21 : Principe de la méthode de traitement des données élaborées

Utilisation dans la méthodologie

Les données élaborées traitées par cette méthode sont :

- les données d'état de dégradation, η, pour la quantification de la durée des phénomènes puis des scénarii (*AQT*),
- les données de probabilité d'apparition, ξ, pour la quantification de la probabilité d'apparition des scénarii (*AQT*),
- les données de caractéristique intrinsèque, κ; et de niveau de performance, μ, pour la quantification des performances fonctionnelles au *PE* {composant, phénomène, mono-fonction, date} puis au *PE* {produit, scénarii, multifonction, date} (*AQP*).

I.2.3. Détail de la méthode de traitement des données élaborées

La démarche de traitement des données élaborées comprend les trois premières étapes (a, b et c), puis l'une des deux dernières (d, e), selon les données élaborées disponibles, présentées à la figure 21.

a) Définition de l'évaluation

Cette première étape consiste à définir ce que l'on souhaite évaluer ; il s'agit donc de préciser :

- l'étape de la méthodologie (analyse quantitative temporelle ou analyse quantitative des performances) à laquelle se rapporte l'évaluation,
- le référentiel de l'étude, dont les éléments à définir sont détaillés dans le tableau 11 (page 51).

Le référentiel de l'étude sert de base à l'évaluation de la qualité des données collectées qui est elle même le point de départ de l'unification et de l'agrégation des données ; la définition de ce référentiel est donc essentielle. Cette définition influence la crédibilité des résultats de la méthode de traitement des données élaborées.

b) Collecte et préparation des données élaborées

Lorsque les données élaborées disponibles pour une évaluation particulière ont été collectées, il est nécessaire de les préparer.
La démarche de préparation d'une donnée élaborée comprend deux étapes :

- **identification de la valeur recherchée**, notée v_a, associée à une valeur fixée, notée v_d. Par exemple, dans le cadre de l'analyse quantitative temporelle, on cherche la date (v_a) associée à un état de dégradation fixé (v_d),
- **détermination de la fonction de masse de croyance**, notée $f_{mc}(x)$, associée à la valeur v_a.

La forme de la fonction de masse de croyance dépend du type de modèle de la donnée élaborée (*cf.* annexe 5) :

- cas 1 – donnée élaborée sous forme d'un modèle analytique : la fonction de masse de croyance est constante pour x égal à v_a,
- cas 2 – donnée élaborée sous forme d'un modèle analytique combiné à un sous-ensemble flou : la fonction de masse de croyance et la fonction d'appartenance associée à v_a ont une forme (rectangle, triangle, trapèze) semblable.

Cas 1 – donnée élaborée sous forme d'un modèle analytique

Dans ce cas, la fonction de masse de croyance est formalisée ainsi :

$$f_{mc}(x) = \begin{cases} m_c & \text{si} \quad x = v_a \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \qquad \textbf{[10]}$$

La masse de croyance m_c d'une donnée élaborée est déduite de l'étape d'évaluation de la qualité des données (*cf.* I.2.3-c).

Une illustration de cette étape de préparation des données pour ce cas 1, est présentée à la figure 22, à l'aide d'une donnée fictive. Dans ce cas de figure, l'erreur (*cf.* I.2.1) est constante ; par conséquent, la fonction de masse de croyance sera soit :

- un intervalle de hauteur m_c lorsque v_a est donnée sous forme d'intervalle, cas de l'exemple 1 de la figure 22,
- un dirac de hauteur m_c lorsque v_a est donnée sous forme ponctuelle, cas de l'exemple 2 de la figure 22.

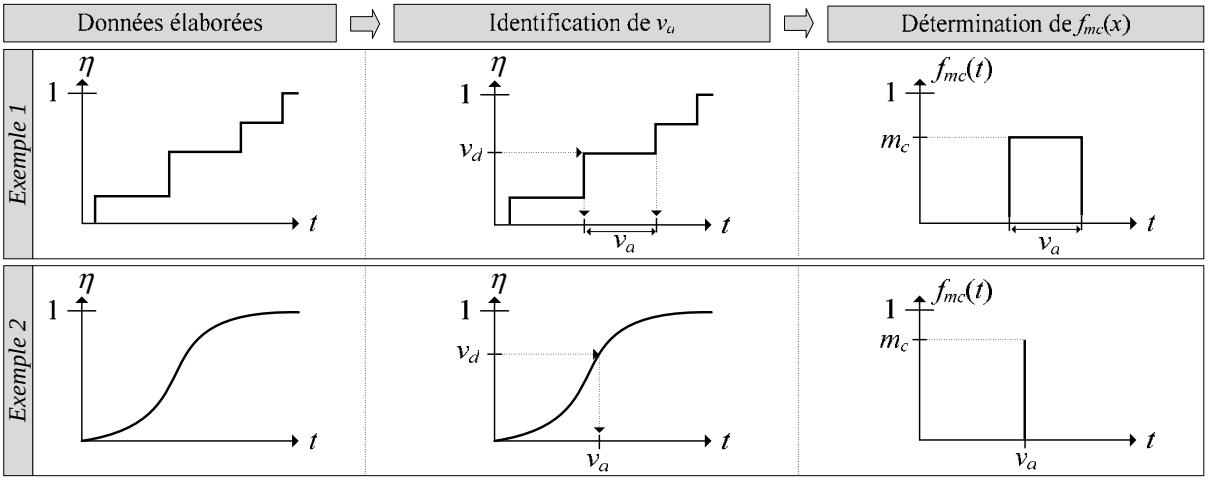


Figure 22 : Illustration de la préparation d'une donnée élaborée – cas du modèle de type 1

Cas 2 – donnée élaborée sous forme d'un modèle analytique combiné à un sous-ensemble flou

Dans ce cas, la fonction de masse de croyance est définie par :

$$f_{mc}(x) = \begin{cases} m_c \cdot g_{ap}(v_d) \cdot g_{ap}(x) & \text{si} \quad x = v_a \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \qquad \textbf{[11]}$$

Une illustration de cette étape de préparation des données pour ce cas 1, est présentée à la figure suivante, à l'aide d'une donnée fictive.

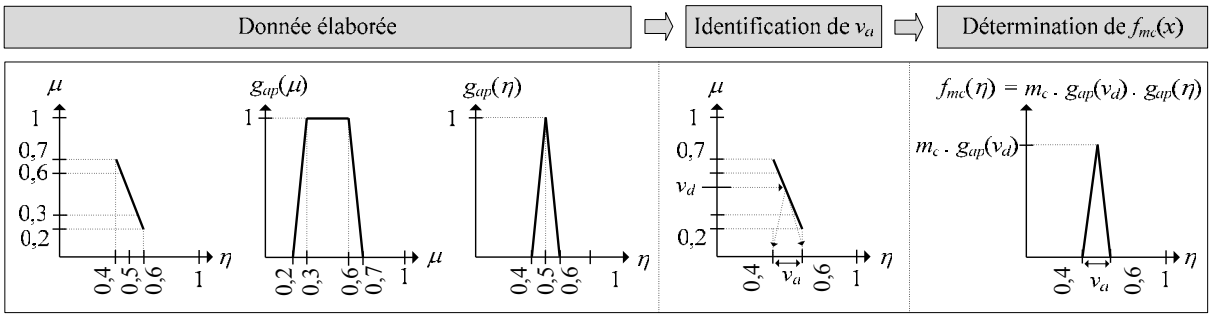


Figure 23 : Illustration de la préparation d'une donnée élaborée – cas du modèle de type 2

La donnée élaborée présentée à la figure 23 correspond au résultat de la transformation d'un dire d'expert en un modèle analytique combiné à un sous-ensemble flou. De ce fait, la fonction d'appartenance de l'état de dégradation est la même pour toute valeur du niveau de performance inclus dans [0,2 ; 0,7]. Par conséquent, la valeur v_d étant incluse dans [0,2 ; 0,7], l'intervalle de valeurs recherché v_a est égal à [0,4 ; 0,6]. La fonction de masse de croyance associée à la valeur v_a est ensuite déterminée en appliquant l'équation [11].

Une telle préparation des données sera indispensable pour le calcul de l'entropie (l'un des critères d'évaluation de la qualité des données, *cf.* I.2.3-c) et pour l'unification des données élaborées (*cf.* I.2.3-d).

c) Évaluation de la qualité d'une donnée élaborée

Pour nous la masse de croyance d'une donnée élaborée est une appréciation de la confiance que l'on peut en avoir ; elle est fournie par l'évaluation de la qualité de cette donnée. Cette évaluation consiste à estimer la part d'incertitude et d'imprécision liées :

- à l'acquisition des données brutes,
- à la transformation des données brutes en données élaborées,
- à la méthode de traitement des données élaborées.

La méthode d'évaluation proposée s'inspire de la méthode NUSAP (« Numerical Unit Spread Assessment Pedigree », [FUN, 90]), méthode adaptée par J. Lair [LAI, 00] pour l'évaluation de la qualité des données de durée de vie des systèmes constructifs (pour lui, produit et son environnement).
D'après l'analyse des sources d'imprécision et d'incertitude des données que nous traitons (*cf.* I.2.1) les emprunts et les apports à cette méthode sont les suivants :

1. conservation de certains critères,
2. introduction d'un critère relatif à la prise en compte (ou non) de la censure lors de l'élaboration d'une donnée brute,
3. introduction d'un critère d'évaluation de l'erreur entrainée par la transformation des données brutes en données élaborées,

4. introduction de critères d'évaluation de l'erreur générée par le traitement des données élaborées,
5. adaptation du calcul de l'entropie d'une donnée élaborée (en suivant une proposition de J. Lair),
6. introduction de « pondérations simplifiées » pour intégrer la différence de critères à considérer selon l'étape de la méthodologie menée,
7. adaptation à nos critères de la grille d'estimation des critères proposée par J. Lair,
8. adaptation à nos critères du calcul de la masse de croyance proposé par J. Lair.

Dans la suite de ce paragraphe, nous introduisons les critères d'évaluation de la qualité des données élaborées (1, 2, 3, 4 et 5), les pondérations simplifiées associées à ces critères (6), puis la grille d'évaluation de ces critères (7) et enfin l'agrégation de ces critères pour obtenir la masse de croyance d'une donnée élaborée (8).

1) Critères conservés

Parmi les critères d'évaluation de la qualité des données proposés par J. Lair, nous retenons les critères, permettant d'évaluer l'erreur allouée aux données brutes :

- CE_1 : **modélisation** de la donnée brute, ce critère est fonction de la technique de recueil d'information (théorie corroborée, modèle hypothétique, étude statistique, étude expérimentale) utilisée pour obtenir cette donnée.
  Par exemple, le temps de fissuration d'un enduit peut être obtenu par un test de vieillissement accéléré (CE_1 : étude expérimentale) ou par l'observation d'un échantillon de bâtiments (CE_1 : étude statistique) ;
- CE_2 : **hypothèses de modélisation**, nous supposons que plus le nombre d'hypothèses faites pour modéliser la donnée est faible, plus celle-ci est fiable ;
- CE_3 : **données de base**, la fiabilité de la donnée brute dépend elle-même de celle des données utilisées pour l'obtenir ;
- CE_4 : **source**, ce critère correspond à la confiance que lui accorde la communauté scientifique.

2) Critère associé à la censure des données

Nous considérons qu'une donnée est plus fiable si elle n'est pas censurée ; c'est la raison pour laquelle nous introduisons un critère « censure », noté CE_5. De plus, nous estimons qu'une donnée censurée est plus fiable qu'une donnée dont la notion de censure n'a pas été prise en compte (ou dont on ignore si elle a été étudiée) lors de son élaboration.

3) Critère associé à l'erreur allouée à la méthode de transformation d'une donnée brute

Pour ce qui est de l'erreur allouée aux données élaborées, nous cherchons à évaluer la qualité des résultats obtenus par la méthode de transformation (*cf.* I.1), c'est-à-dire la **représentativité**, CE_6, de la donnée brute par la donnée élaborée.

4) Critères associés à l'erreur générée par la méthode de traitement des données élaborées

Les critères d'évaluation de l'erreur liée à la méthode de traitement des données élaborées, visent à prendre en compte d'une part, la cohérence de la donnée élaborée par rapport au référentiel de l'étude considéré et d'autre part, l'entropie de cette donnée.

Comme nous l'avons précédemment introduit (*cf.* tableau 11, page 51), un référentiel de l'étude est défini par un point d'évaluation (*PE*), des entités géométrique, phénoménologique et fonctionnelle, et des sollicitations.
Par conséquent les critères d'évaluation de la cohérence intègrent :

- axe géométrique : la correspondance de l'échelle, CE_7, et de l'entité géométrique, CE_8,
- axe phénoménologique : la correspondance de l'échelle, CE_9, et de l'entité phénoménologique, CE_{10},
- axe fonctionnel : la correspondance de l'échelle, CE_{11}, et de l'entité fonctionnelle, CE_{12},
- la correspondance des caractéristiques intrinsèques, CE_{13},
- la correspondance (nature et intensité) des sollicitations, CE_{14}.

Le calcul de l'**entropie** d'une donnée, critère CE_{15}, est détaillé ci-dessous.

Remarque : Parmi les critères proposés certains sont « intrinsèques » à la donnée élaborée, c'est-à-dire qu'ils peuvent être évalués quelque soit le référentiel de l'étude considéré, c'est le cas des critères associés aux données brutes, CE_1 à CE_5, aux données élaborées, CE_6, et à l'entropie, CE_{15}. A l'inverse les critères permettant d'évaluer la cohérence entre la donnée élaborée et le référentiel de l'étude, CE_7 à CE_{14}, nécessitent la définition de ce référentiel.

5) Calcul de l'entropie d'une donnée élaborée

L'entropie présentée dans ce paragraphe coïncide avec celle définie par Shannon [SHA, 48], [WEA, 75], dans le cadre de la théorie de l'information, puis explicitée par [LAI, 00] dans le cadre de l'évaluation de la qualité de données de durée de vie.

En théorie de l'information, l'entropie de Shannon correspond à la quantité d'information contenue dans un signal physique [WEA, 75], par extension elle permet de mesurer l'incertitude moyenne d'une variable aléatoire discrète [KLI, 04]. Cette entropie est inversement proportionnelle à la certitude d'un signal.
Par exemple, si l'on considère deux signaux ayant pour probabilités p_1 et $p_2 = 1 - p_1$, l'entropie sera maximale lorsque ces deux signaux auront la même probabilité d'apparition, elle décroît lorsqu'un signal devient plus probable que l'autre et s'annule lorsqu'un signal est certain (p_1 ou p_2 égal à 1).

Dans notre contexte d'évaluation de la qualité d'une donnée élaborée, nous utilisons cette entropie pour évaluer la certitude que l'on peut avoir en cette donnée. Nous considérons que la certitude en une donnée est inversement proportionnelle à la dispersion de sa masse de croyance sur le cadre de discernement ; c'est-à-dire qu'une donné centrée en une valeur présentera plus d'incertitude (il y a peu de chance que ce résultat soit réaliste) qu'un intervalle de données incluant cette valeur.

Selon notre symbolique, l'entropie propre d'une donnée élaborée *l* est égale à :

$$H_l\left(f_{mc}(x) \middle| x \in X\right) = -\sum_{x \in X} f_{mc}(x) \ln\left(f_{mc}(x)\right) \quad \textbf{[12]}$$

Remarque : nous retenons la formule de l'entropie applicable à une variable discrète et non à une variable continue dans la mesure où la fonction de masse de croyance $f_{mc}(x)$ ne répond pas à la condition de continuité sur l'ensemble du cadre de discernement décrite dans [NAN, 06].

La préparation des données élaborées (*cf.* I.2.3-b)) nous donne la forme de la fonction de masse de croyance (par exemple $f_{mc}(t)$ dans le cadre de l'analyse quantitative temporelle). A cette étape, pour pouvoir calculer l'entropie propre, il est nécessaire de vérifier l'axiome de Kolmogorov, c'est-à-dire qu'il faut fixer la hauteur de la fonction de masse de croyance de telle sorte que :

$$\sum_{x \in X} f_{mc}(x) = 1 \quad \textbf{[13]}$$

Les entropies propres associées aux exemples des données élaborées des figures 22 et 23 ci-avant sont présentées ci-après à la figure 24.

La valeur maximale que peut prendre l'entropie propre est celle du cadre de discernement, notée H_{Θ}, dans la mesure où il regroupe toutes les valeurs possibles. Dans notre contexte le cadre de discernement peut être [t_{min} ; t_{max}], lorsqu'il s'agit de la variable de temps, ou [0 ; 1] pour les autres variables (ξ, κ, μ, η).
Les valeurs t_{min} et t_{max} sont déterminées en considérant toutes les valeurs des données élaborées prises en compte pour une unification. Il s'agit des valeurs minimales et maximales des domaines de dates de réalisation de l'ensemble des données élaborées considérées.

Remarque : la fonction du logarithme népérien étant définie sur l'intervalle]0 ; +∞[et non [0 ; +∞[, nous retiendrons l'approximation suivante lorsque Θ sera égal à [0 ; 1] :

$$H_{\Theta} = -\ln\left(\frac{1}{0{,}99}\right) \quad \textbf{[14]}$$

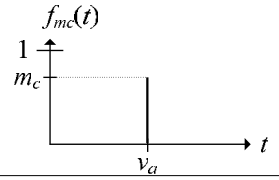
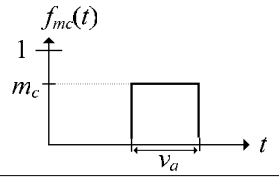
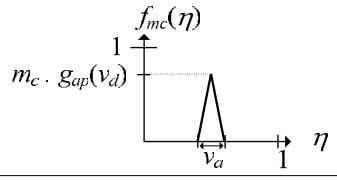
Donnée 1 (*figure* 22)	Donnée 2 (*figure* 22)	Donnée 3 (*figure* 23)
		
Préparation selon l'équation [6]		
Néant	$m_c = 1 / v_a$	$m_c \cdot g_{ap}(v_d) = 2 / v_a$
Entropie propre		
$H_1 = 0$	$H_2 = -\ln(1/v_a)$	$H_3 = (1/2 - \ln(2/v_a))$

Figure 24 : Exemples d'entropie propre associés aux figures 22 et 23

Connaissant l'entropie propre d'une donnée et l'entropie propre du cadre de discernement, il est possible de définir une entropie relative H_{R_l} [WEA, 75] telle que :

$$H_{R_l} = \frac{H_l}{H_{\Theta}} \quad \textbf{[15]}$$

Dans le cadre de notre évaluation de la qualité des données, nous retenons cette entropie relative, qui prend ses valeurs dans [0 ; 1].

6) Pondérations simplifiées

Dans un souci d'opérationnalité nous proposons une évaluation de la qualité des données qui soit commune aux analyses quantitatives de la méthodologie utilisant des données élaborées (analyse quantitative temporelle et analyse quantitative des performances).

Dans la mesure où tous les critères proposés précédemment ne sont pas à prendre en compte selon l'analyse quantitative menée ; nous proposons une « pondération simplifiée » telle que :

$$pCE_r = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad CE_r \text{ est à considérer} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \qquad \textbf{[16]}$$

où pCE_r correspond au poids associé au critère CE_r.

Les valeurs prises par ces pondérations selon l'analyse quantitative menée sont détaillées dans le tableau 15.

	Donnée brute					Donnée élaborée	Méthode de traitement des données élaborées								
	CE_1	CE_2	CE_3	CE_4	CE_5	CE_6	CE_7	CE_8	CE_9	CE_{10}	CE_{11}	CE_{12}	CE_{13}	CE_{14}	CE_{15}
Analyse temporelle	1										0			1	
Analyse des performances	1														

Tableau 15 : Poids* $\mathbf{pCE_r}$ *associés aux critères* $\mathbf{CE_r}$ *d'évaluation de la qualité des données élaborées

7) Grille d'estimation des critères

La grille d'estimation adaptée à nos critères que nous proposons est détaillée au tableau 16. La grille initialement proposée par J. Lair est notée en gras dans ce tableau.

			Valeurs prises par les critères			
Critères			1	2/3	1/3	0
Donnée brute	**Modélisation**	***CE_1***	**Théorie corroborée**	**Théorie non corroborée**	**Étude statistique**	**Non modélisée**
	Hypothèses de modélisation	***CE_2***	**Très faible**	**Faible**	**Forte**	**Très forte**
	Données de base	***CE_3***	**Plan d'expérience**	**Retour d'expérience**	**Estimation « éduquée »**	**Estimation « non éduquée »**
	Source	***CE_4***	**Référencée**	**Interne**	**Conférence**	**Isolée**
	Censure	CE_5	Non censurée	Partiellement censurée	Censurée	Non prise en compte
Donnée élaborée	Représentativité	CE_6	Parfaite	Correcte	Faible	Pauvre
Méthode de traitement des données élaborées	Correspondance de l'échelle géométrique	CE_7	Entière	Correcte	Faible	Pauvre
	Correspondance de l'entité géométrique	CE_8	Entière	Correcte	Faible	Pauvre
	Correspondance de l'échelle phénoménologique	CE_9	Entière	Correcte	Faible	Pauvre
	Correspondance de l'entité phénoménologique	CE_{10}	Entière	Correcte	Faible	Pauvre
	Correspondance de l'échelle fonctionnelle	CE_{11}	Entière	Correcte	Faible	Pauvre
	Correspondance de l'entité fonctionnelle	CE_{12}	Entière	Correcte	Faible	Pauvre
	Correspondance des caractéristiques intrinsèques (κ)	CE_{13}	Entière	Correcte	Faible	Pauvre
	Correspondance des sollicitations	CE_{14}	Sollicitations identiques	Correcte	Faible	Pauvre
	Entropie	CE_{15}	Valeur calculée continue			

Tableau 16 : Grille d'estimation des critères d'évaluation de la qualité des données élaborées

Nous proposons une échelle à quatre niveaux (0, 1/3, 2/3, 1) pour l'évaluation de nos critères, afin qu'elle ne présente pas de valeur centrale. Le but étant d'inciter l'utilisateur à ne pas se réfugier dans la valeur centrale.

8) Calcul de la masse de croyance d'une donnée élaborée

Le résultat de l'évaluation de la qualité d'une donnée élaborée est sa masse de croyance m_c. Elle correspond à la somme des évaluations de chaque critère, selon la grille proposée au I.2.3-7, pondérée par sa « pondération simplifiée » associée, définie au I.2.3-6 et divisée par la somme des pondérations.
Les critères et les pondérations simplifiées étant évalués sur des échelles variant de 0 à 1, la masse de croyance est donc une valeur normée, prenant ses valeurs dans [0 ; 1], définie par :

$$m_c = \frac{\sum_{r=1}^{15} CE_r \cdot pCE_r}{\sum_{r=1}^{15} pCE_r} \quad \textbf{[17]}$$

Par exemple, la masse de croyance d'une donnée élaborée associée à l'analyse quantitative temporelle pour laquelle $CE_1 = CE_2 = CE_3 = 2/3$, $CE_4 = 1$, $CE_5 = CE_6 = CE_7 = 1/3$, $CE_8 = 0$, $CE_9 = CE_{10} = CE_{14} = 1/3$ et $CE_{15} = 0{,}62$, sera égale à : 0,47.
Dans ce cas $pCE_{11} = pCE_{12} = pCE_{13} = 0$.

d) Unification des données élaborées

L'unification des données consiste à combiner l'ensemble des données élaborées disponibles en un même *PE* de l'*EE* et à exploiter la complémentarité de leur source pour obtenir une donnée consensuelle et ses indicateurs de qualité.
Le point de départ de l'unification est un ensemble de triplets {valeur recherchée (v_a) ; fonction de masse de croyance ($f_{mc}(x)$) ; masse de croyance (m_c)} dont les démarches d'obtention ont été décrites aux paragraphes I.2.3-b et c.

Nous proposons d'unifier nos données élaborées en utilisant la méthode de fusion des données de durées de vie proposée par J. Lair [Lair, 00]. Notre apport à cette méthode réside dans son application à d'autres types de données (η, ξ, κ, μ) présentées au paragraphe I.2.2. Concrètement la préparation des données avant fusion (*cf.* I.2.3-b) et l'exploitation des résultats de la fusion sont différentes mais le principe de fusion, les stratégies d'assemblage et les résultats de la fusion sont identiques à ceux proposés par J. Lair. Nous présentons donc dans la suite de ce paragraphe :

1. le principe de la fusion des données,
2. les stratégies d'assemblages,
3. les résultats de la fusion des données,
4. les résultats de l'unification : l'exploitation des résultats de la fusion.

1) Principe de la fusion des données

La méthode de fusion des données proposée par J. Lair [LAI, 00] est basée sur la théorie de Dempster-Shafer [SHA, 76].

Considérant deux preuves P_1 et P_2 pointant sur deux sous-ensembles S_1 et S_2 du cadre de discernement, auxquelles sont associées respectivement les masses de croyance $m_c(S_1)$ et $m_c(S_2)$, la fusion de ces deux preuves vise à déterminer d'une part, les masses de croyances qui peuvent être attribuées à l'intersection de ces deux sous-ensembles et à l'ignorance et d'autre part, la valeur de leur consensus.
Le principe d'affectation des masses, selon la théorie de Dempster-Shafer, pour les preuves P_1 et P_2 lorsqu'elles sont d'une part concordantes et d'autre part conflictuelles est présenté respectivement aux tableaux 17 et 18.

	S_1	$S_1 \cap S_2 \neq \phi$	S_2	Ignorance	
Preuve P_1	$m_c(S_1)$	$m_c(S_1)$	$1 - m_c(S_1)$	$1 - m_c(S_1)$	
Preuve P_2	$1 - m_c(S_2)$	$m_c(S_2)$	$m_c(S_2)$	$1 - m_c(S_2)$	
Consensus	$m_c(S_1)\cdot(1 - m_c(S_2))$	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$	$(1 - m_c(S_1))\cdot m_c(S_2)$	$(1 - m_c(S_1))\cdot(1 - m_c(S_2))$	$\Sigma = 1$

Tableau 17 : Affectation des masses pour deux preuves concordantes

	S_1	$S_1 \cap S_2 = \phi$	S_2	Ignorance	
Preuve P_1	$m_c(S_1)$		$1 - m_c(S_1)$	$1 - m_c(S_1)$	
Preuve P_2	$1 - m_c(S_2)$		$m_c(S_2)$	$1 - m_c(S_2)$	
Consensus	$m_c(S_1)\cdot(1 - m_c(S_2))$		$(1 - m_c(S_1))\cdot m_c(S_2)$	$(1 - m_c(S_1))\cdot(1 - m_c(S_2))$	$\Sigma = 1 - m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$

Tableau 18 : Affectation des masses pour deux preuves conflictuelles

Dans les deux cas (tableaux 17 et 18) le consensus d'un sous-ensemble (S_1, S_2, $S_1 \cap S_2$ et Θ / ignorance) est égal au produit des masses de croyance affectées à ce sous-ensemble selon chacune des preuves.
Dans le cas de preuves conflictuelles (tableau 18), la distance $m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ par rapport à 1 de la somme des consensus traduit l'affectation de cette masse conflictuelle à un ensemble inexistant. Pour résoudre ce problème, la règle de Dempster recommande de réaffecter cette masse proportionnellement sur les trois autres masses. Ce principe de réaffectation est illustré au tableau 19.

	S_1	$S_1 \cap S_2 = \phi$	S_2	Ignorance	
Preuve P_1	$m_c(S_1)$		$1 - m_c(S_1)$	$1 - m_c(S_1)$	
Preuve P_2	$1 - m_c(S_2)$		$m_c(S_2)$	$1 - m_c(S_2)$	
Consensus	$\frac{m_c(S_1)\cdot(1-m_c(S_2))}{1-m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)}$		$\frac{(1-m_c(S_1))\cdot m_c(S_2)}{1-m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)}$	$\frac{(1-m_c(S_1))\cdot(1-m_c(S_2))}{1-m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)}$	$\Sigma = 1$

Tableau 19 : Réaffectation des masses des consensus selon la règle de Dempster (preuves conflictuelles)

Comme l'a indiqué J. Lair, cette règle d'assemblage de Dempster n'est pas satisfaisante lors de la fusion de deux preuves fortement conflictuelles. Elle engendre en effet des incohérences, ceci est préjudiciable dans la mesure où les données élaborées que nous souhaitons fusionner peuvent être fortement conflictuelles.
Pour remédier à cette limitation, [LAI, 00] a étudié différentes règles d'assemblage de données et proposé des stratégies d'assemblages, c'est-à-dire un algorithme de sélection des règles d'assemblages les plus appropriées aux données à fusionner. Nous présentons ces règles d'assemblage et ces stratégies au paragraphe I.2.3-d-2.

La fusion de n preuves est obtenue par la réalisation de n-1 fusions successives de deux preuves. Ceci peut se formaliser ainsi :

$$(((P_1 \oplus P_2) \oplus P_3)...) \oplus P_n \qquad \text{où } \oplus \text{ représente l'opération de fusion de deux preuves} \qquad \textbf{[18]}$$

2) Stratégies d'assemblage

Nous avons vu au paragraphe I.2.3-d-1 la procédure d'affectation des masses selon la règle d'intersection de Dempster et ses limites lors de la fusion de preuves conflictuelles. J. Lair a étudié l'influence du choix de la règle d'assemblage et du degré de conflit entre les preuves fusionnées sur l'affectation des masses.
Considérons deux preuves P_1 et P_2 pointant respectivement sur $S_1 = [a_1, a_2]$ et $S_2 = [b_1, b_2]$ dont les masses de croyances associées sont notées $m_c(S_1)$ et $m_c(S_2)$; une synthèse de cette étude est présentée dans le tableau 20.

	Règle d'assemblage				
	Intersection (Dempster)	Intersection avec faible cohérence	Union (Dubois & Prade)	Report sur l'ignorance (Yager)	Union systématique
a_1 $m_c(S_1)$ a_2 / b_1 $m_c(S_2)$ b_2	Conflit	Conflit	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[a_1, b_2]$	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur Θ	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[a_1, b_2]$
a_1 $m_c(S_1)$ a_2 / b_1 $m_c(S_2)$ b_2	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, a_2]$	Si $[b_1, a_2]<$ lim. $m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[a_1, b_2]$ Sinon $m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, a_2]$	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, a_2]$	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, a_2]$	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, a_2]$
a_1 $m_c(S_1)$ a_2 / b_1 $m_c(S_2)$ b_2	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, b_2]$	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, b_2]$	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, b_2]$	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, b_2]$	$m_c(S_1)\cdot m_c(S_2)$ sur $[b_1, b_2]$

Tableau 20 : Influence de la règle d'assemblage et du conflit sur l'affectation des masses (d'après [LAI, 00])

L'approche proposée par J. Lair consiste à mener une fusion fiable – en minimisant l'ignorance – et la plus informative possible – en minimisant le conflit – il s'agit donc de réaliser un compromis entre ignorance et conflit qui soit le plus pertinent possible.
Afin de faciliter le choix de la règle d'assemblage à considérer en fonction du niveau de conflit ou de cohérence entre preuves, [LAI, 00] a proposé l'algorithme de choix de stratégie suivant :

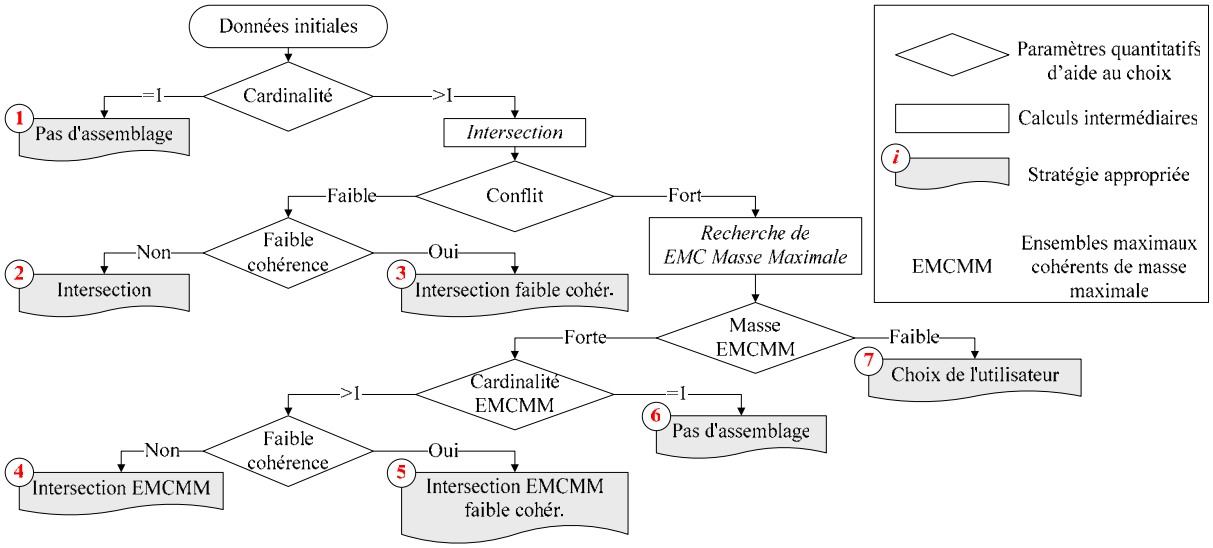


Figure 25 : Algorithme de choix de stratégies d'assemblage (d'après [LAI, 00])

3) Résultats de la fusion des données

Le résultat de la fusion des données est une répartition de masses de croyance sur les intervalles résultant de la stratégie d'assemblage choisie (*cf.* figure 25).
Dans le but de faciliter la présentation et l'exploitation de ce résultat, J. Lair [LAI, 00] propose d'utiliser trois quantités – la croyance, la plausibilité, la probabilité de Smets – empruntes à la théorie de l'évidence.
Considérons un sous-ensemble θ du cadre de discernement Θ et S_l les sous-ensembles des preuves P_l à fusionner. Les sous-ensembles résultants de la fusion sont notés R_l. La vraisemblance de θ est caractérisée par sa croyance (également nommée crédibilité) et sa plausibilité [SHA, 76], [INR, 03].

La **croyance** associée à θ, notée $Bel(\theta)$, totalise toutes les raisons de soutenir θ. Elle est la somme des masses de croyance associées aux sous-ensembles strictement inclus dans θ. Ceci peut se formaliser ainsi :

$$Bel(\theta) = \sum_{R_l \subseteq \theta} m_c(R_l) \quad \textbf{[19]}$$

La **plausibilité** d'un sous-ensemble θ notée $Pl(\theta)$, exprime l'intensité avec laquelle on devrait soutenir θ. Elle correspond à la somme des masses de croyance associées aux intersections non nulles des sous-ensembles R_l et de θ ; c'est-à-dire :

$$Pl(\theta) = \sum_{\theta \cap R_l \neq \phi} m_c(R_l) \quad \textbf{[20]}$$

Le couple (croyance, plausibilité) est approximé par une probabilité équirépartissant la masse placée sur chaque R_l, différent du singleton, sur les R_l qui la compose [INR, 03]. Il s'agit de la **probabilité de Smets** [DUB, 90], ou probabilité pignistique, notée $P(\theta)$ lorsqu'elle est associée à un sous-ensemble θ ; elle est définie par :

$$P(\theta) = \sum_{\theta \in R_l} \frac{m_c(R_l)}{|R_l|} \quad \textbf{[21]}$$

Ces trois quantités vérifient : $Bel(\theta) \leq P(\theta) \leq Pl(\theta)$.

J. Lair [LAI, 00] utilise ces trois quantités afin de définir une durée de vie caractéristique probable à *k* % et son intervalle d'incertitude ([durée de vie caractéristique plausible, durée de vie caractéristique crédible]), en traçant les distributions cumulées de ces trois quantités. Ce pourcentage signifie que *k* % des observations auront une durée de vie inférieure à la durée de vie caractéristique probable à *k* %.

Afin d'extraire simplement et rapidement une durée de vie consensuelle et les indicateurs de conflit et d'ignorance d'un ensemble de données de durées de vie, J. Lair propose de tracer la courbe de consensus des masses de croyance qui résultent de la fusion ; elle est définie par :

$$C_f(\theta) = \sum_{\theta \in R_l} m_c(R_l) \quad \textbf{[22]}$$

Dans notre contexte, c'est-à-dire pour d'autres types de données, l'utilisation que nous proposons de ces quatre quantités (croyance, plausibilité, probabilité de Smets et consensus) est partiellement différente et présentée dans le paragraphe ci-après (I.2.3-d-4).

4) Résultats de l'unification : exploitation des résultats de la fusion

Nous cherchons à obtenir une donnée consensuelle et ses indicateurs de qualité.
Notre démarche d'exploitation des résultats de la fusion des données élaborées comprend alors deux étapes :

- recherche de la donnée consensuelle,
- détermination des indicateurs de qualité.

Recherche de la donnée consensuelle

Nous déduisons la donnée consensuelle θ à partir de la courbe de consensus $C_f(\theta)$; il s'agit de la donnée regroupant le maximum de consensus. Afin que la donnée obtenue soit la plus informative possible, nous proposons de retenir l'intervalle θ égal à $0{,}8 \times C_f(\theta)$.

L'intervalle sera donc plus large que si nous retenions celui associé à la valeur maximale du consensus. Le but est en effet d'éviter de retenir un intervalle trop restreint, donc peu réaliste dans le contexte de notre méthodologie. Nous reviendrons sur la validité de cette proposition en troisième partie de ce mémoire.

Détermination des indicateurs de qualité

Nous déduisons de la répartition des masses de croyance qui résultent de la fusion la croyance, la probabilité de Smets et la plausibilité associées à la donnée consensuelle θ. Nous regroupons ces trois quantités sous le terme d'indicateurs de qualité noté $Ind(\theta)$, tel que $Ind(\theta) = \{Bel(\theta), P(\theta), Pl(\theta)\}$.

Ces indicateurs nous fournissent une information complète sur la confiance que l'on peut accorder à la donnée consensuelle obtenue. Par la suite, c'est-à-dire lors de l'agrégation des données élaborées et lors de l'application de cette méthode dans la méthodologie, nous ne retiendrons que la probabilité de Smets pour trois raisons :

- nous souhaitons fournir aux utilisateurs une information utile sur la qualité des données qui ne soit pas surabondante,
- la probabilité de Smets (valeur intermédiaire) nous semble être un bon compromis entre la croyance que l'on pourrait qualifier de pessimiste et la plausibilité qui pourrait à l'inverse être qualifiée d'optimiste,
- nous n'avons pas étudié la démarche d'obtention de la croyance et de la plausibilité lors de l'agrégation de données élaborées.

La probabilité de Smets nous servira d'indicateur de qualité de l'unification des données élaborées d'une part et de pondération des critères d'évaluation de la criticité d'autre part (*cf.* I.4.2-c-2).

Nous illustrons cette démarche d'unification à l'aide des trois données élaborées fictives, détaillées à la figure 26.

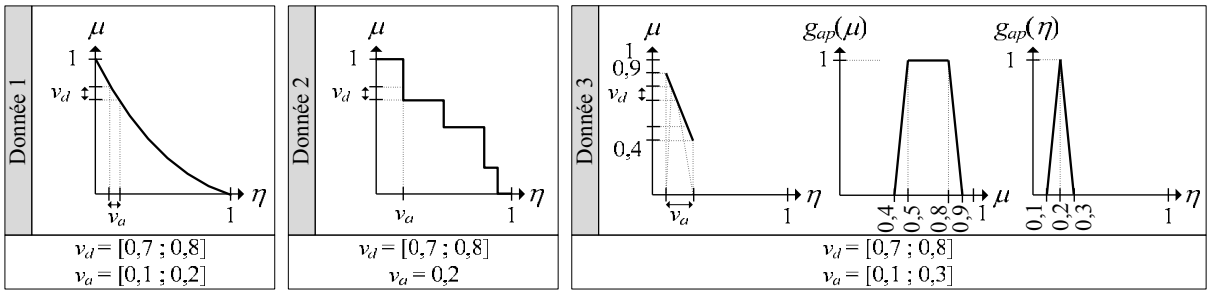


Figure 26 : Données élaborées fictives pour l'illustration de la démarche d'unification

Le résultat de la préparation des trois données élaborées de la figure 26 est présenté à la figure suivante :

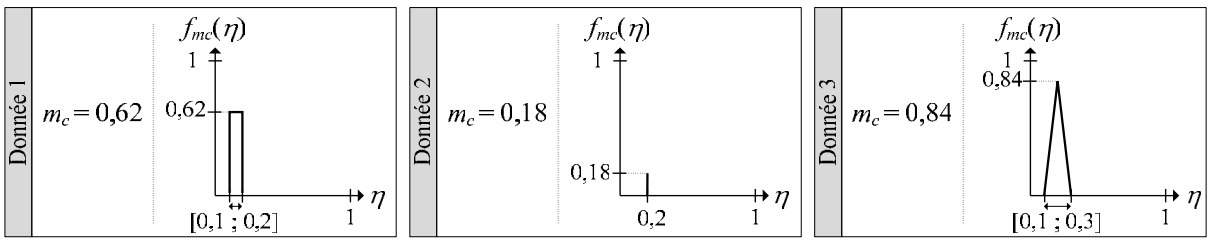


Figure 27 : Préparation des données élaborées de la figure 26

Les différentes étapes d'unification des trois données élaborées de la figure 26, sont présentées à la figure 28 ; elles sont :

- l'obtention des intervalles à fusionner. Ils correspondent à v_a lorsque la fonction de masse de croyance est un intervalle ou un Dirac, et ils sont déduits des α-coupes lorsque la fonction de masse de croyance est un sous-ensemble flou (*cf.* I.2.1.1 de la partie C) ;
- la répartition des masse par la procédure de fusion ;
- le tracé de la courbe de consensus ;
- la déduction de la donnée consensuelle ;
- le calcul des indicateurs de qualité.

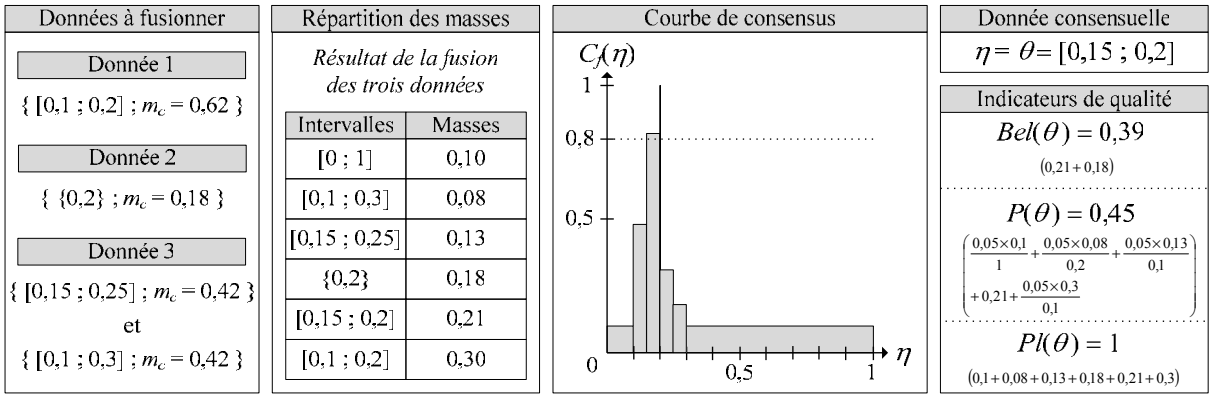


Figure 28 : Résultat de l'unification des trois données élaborées fictives de la figure 26

La procédure de fusion telle que présentée à la figure 28 aboutit au fait suivant : la valeur maximale du consensus est centrée sur le singleton {0,2}. En appliquant la démarche proposée précédemment, c'est-à-dire retenir l'intervalle θ égal à $0{,}8\times C_f(\theta)$, nous retenons l'intervalle [0,15 ; 0,2].

Les indicateurs de qualité sont obtenus en appliquant les équations [19], [20] et [21] présentées au paragraphe I.2.3-d-3. La plausibilité égale à un signifie qu'il n'y a pas de conflit entre les données élaborées.

e) Agrégation des données élaborées

L'agrégation des données élaborées consiste à exploiter au mieux l'ensemble des données disponibles en des points inférieurs pour obtenir une évaluation en un point objectif. Une agrégation permet d'obtenir une donnée consensuelle et son indicateur de qualité (la probabilité de Smets associée à cette donnée consensuelle).

Nous proposons trois démarches d'agrégation associées aux trois problématiques suivantes :

- évaluation de la durée d'un scénario (*PO*) à partir des durées de ses phénomènes (*PI*), cette démarche est détaillée au paragraphe I.3,
- évaluation de la probabilité d'apparition d'un scénario (*PO*) à partir des probabilités d'apparition de ses phénomènes (*PI*), elle est présentée au paragraphe I.3,
- évaluation des niveaux de performance des fonctions et combinaison de fonctions (*PO*) à partir des niveaux de performance de chaque fonction associée à un phénomène (*PI*), cette approche est décrite au paragraphe I.5.

I.2.4. Synthèse de la méthode de traitement des données élaborées

La méthode de traitement des données élaborées que nous proposons comprend une étape de préparation des données (définition de l'étude, collecte et préparation des données, et l'évaluation de leur qualité) puis :

- une unification, lorsque les données élaborées sont relatives à un même point d'évaluation de l'espace des évaluations,
- une agrégation, lorsque les données utilisées pour obtenir une évaluation en un point objectif sont relatives à des points inférieurs.

Le résultat de cette méthode est une donnée consensuelle, c'est-à-dire qui regroupe le maximum de consensus, et les indicateurs de qualité (croyance, probabilité de Smets et plausibilité) associés à cette donnée.

Nos apports essentiels sont :

- une méthode de traitement des données permettant d'exploiter l'ensemble des données multi-sources disponibles à différents points de l'espace des évaluations, pour l'évaluation d'un point objectif à n'importe quel emplacement de cet espace des évaluations,
- une adaptation de la fusion des données aux données utilisées par notre méthodologie (données temporelles et de performance),
- une méthode permettant de passer d'un point d'évaluation de l'espace des évaluations à un point supérieur (agrégation).

I.3. Méthode d'évaluation de la durée d'un scénario

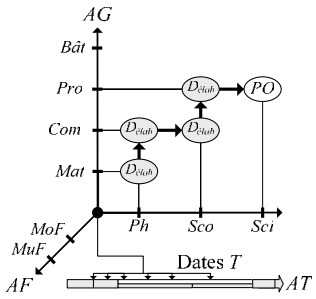
Données entrantes	Données sortantes	Positionnement dans l'*EE*	Etape de la méthodologie
• Résultats de l'*AQL* • États de dégradation • Taux de transition • Probabilités d'apparition	Durée et probabilité d'apparition des scénarii indépendants		*AQT* (analyse quantitative temporelle)

Tableau 21 : Encadré de la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario

I.3.1. Notations, principe et utilisation de la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario

Notations

Les notations utilisées dans la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario (partie quantification temporelle) sont présentées et illustrées à la figure 29, à partir de l'exemple d'un scénario Sc_j composé de n phénomènes Ph_i.

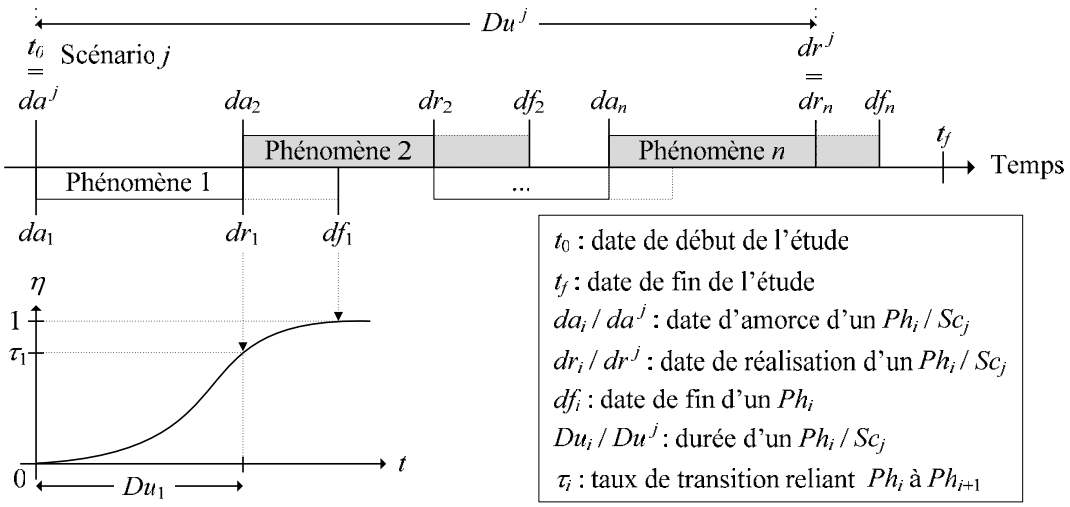


Figure 29 : Notations relatives à la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario

Les notations employées pour la quantification de la probabilité d'apparition des phénomènes et des scénarii sont les suivantes :

- ξ_i / ξ^j : probabilité d'apparition d'un Ph_i / Sc_j,
- $I\xi_i^D$: indicateur de démarrage d'un Ph_i,
- $I\xi_i^{D1}$: indicateur d'environnement associé à un Ph_i,
- $I\xi_i^{D2}$: indicateur de qualité de conception d'un produit associé à un Ph_i,
- $I\xi_i^C$: indicateur de cinétique d'un Ph_i,
- $\delta(X)$: domaine de X tel que $\delta(X) = [\, X_{\min} \;;\; X_{\max} \,]$.

Principe

Cette méthode d'évaluation consiste à obtenir les durées des scénarii indépendants à partir de données d'évolution des mécanismes de dégradation et des probabilités d'apparition provenant de différentes sources et obtenues à différents *PE* de l'*EE*.
Nous appelons un scénario indépendant, un scénario qui est en interaction avec aucun autre scénario.

La problématique de cette méthode peut être formalisée en utilisant la terminologie de la théorie des graphes [KAU, 68], [COG, 03] :

- un sommet est pour nous un phénomène,
- un arc représente le lien entre deux phénomènes consécutifs,
- un graphe correspond à l'ensemble des scénarii (en interactions) d'un produit de construction.

L'analyse qualitative d'un produit de construction (*cf.* IV.1), par l'identification de l'ensemble des phénomènes de dégradation et de leurs enchaînements, permet de construire ce graphe.

Nous associons les caractéristiques suivantes à ce graphe :

- à chaque sommet correspond la durée du phénomène correspondant ;
- à chaque arc correspond d'une part, le taux de transition (τ_i) reliant le sommet antérieur (Ph_i) et le sommet postérieur (Ph_{i+1}) à cet arc, et d'autre part, la probabilité d'apparition ξ_i de Ph_i. Le passage du sommet antérieur au sommet postérieur ne sera possible que si l'état de dégradation du phénomène Ph_i a atteint ce taux de transition ;

- un sommet peut avoir plusieurs arcs antérieurs et plusieurs arcs postérieurs. Les arcs antérieurs à un même sommet sont liés soit par une relation « ET » soit par une relation « OU » :
  - relation « ET » : le passage à un sommet postérieur ne sera possible que si tous les états de dégradation associés aux sommets antérieurs ont atteint leur taux de transition ;
  - relation « OU » : le passage à un sommet postérieur ne sera possible que si au moins l'un des états de dégradation associés aux sommets antérieurs a atteint son taux de transition et que sa probabilité d'apparition est supérieure à celles des autres sommets antérieurs.

La problématique de cette méthode est alors : comment déterminer les caractéristiques de ce graphe (taux de transition, durée d'un phénomène, probabilité d'apparition d'un phénomène) puis en déduire les durées et les probabilités d'apparition des scénarii indépendants ?

Nous proposons d'y répondre en résolvant successivement les cinq problèmes suivants :

- **problème 1 :** en considérant les scénarii indépendants et en faisant l'hypothèse que les probabilités d'apparition de l'ensemble des phénomènes sont identiques, quelle est la durée d'un phénomène, puis d'un scénario ?
- **problème 2 :** en considérant toujours que les scénarii sont indépendants, quelle est la probabilité d'apparition d'un phénomène, puis d'un scénario ?
- **problème 3 :** en considérant les scénarii en interactions, comment gérer ces interactions, c'est-à-dire comme obtenir les scénarii indépendants puis leurs durée et probabilité d'apparition ?

Utilisation dans la méthodologie

Cette méthode d'évaluation de la durée d'un scénario sera appliquée lors de la quantification temporelle des scénarii de dégradation, c'est-à-dire à l'étape d'analyse quantitative temporelle de la méthodologie (*cf.* IV.2).

I.3.2. Détail de la méthode d'évaluation de la date de réalisation d'un scénario

La résolution des trois problèmes décrits précédemment (*cf.* I.3.1) comprend cinq étapes :

a) évaluation de la durée d'un phénomène (problème 1),
b) évaluation de la durée d'un scénario (problème 1),
c) évaluation de la probabilité d'apparition d'un phénomène (problème 2),
d) évaluation de la probabilité d'apparition d'un scénario (problème 2),
e) gestion des interactions entre scénarii (problème 3).

a) Evaluation de la durée d'un phénomène

L'évaluation de la durée d'un phénomène est décomposée en trois étapes :

1. identification du référentiel de l'étude,
2. détermination du taux de transition,
3. évaluation de la durée d'un phénomène.

1) Identification du référentiel de l'étude

Le référentiel de l'étude sert ici à décrire le phénomène que l'on souhaite quantifier temporellement. Comme nous l'avons précisé au tableau 11 (page 51), il est nécessaire de définir l'entité géométrique, l'entité phénoménologique, la nature et l'intensité des sollicitations environnementales ; le point d'évaluation étant défini par le quadruplet {matériau ; phénomène ; mono-fonction ; date inconnue}.

Ce référentiel va nous permettre, dans un premier temps, d'orienter la collecte des données d'évolution des mécanismes de dégradation et, dans un deuxième temps, d'évaluer la qualité de ces données.

2) Détermination du taux de transition

Définition

Le taux de transition τ_i entre deux phénomènes successifs Ph_i et Ph_{i+1} correspond à la valeur d'état de dégradation de Ph_i pour laquelle Ph_{i+1} peut démarrer.
Ce concept peut être illustré par un exemple simple : considérons un élément en béton armé, la corrosion des armatures peut démarrer avant que cet élément ne soit totalement fissuré (fissuration traversante). Le taux de transition entre la fissuration du béton et la corrosion des armatures correspondra à la profondeur de la fissure pour laquelle la corrosion peut commencer.
Si un scénario Sc_j comprend n phénomènes, le taux de transition τ_n correspond à la valeur d'état de dégradation du dernier phénomène, celle pour laquelle le scénario se réalise (*cf.* figure 29).

Cas particulier

L'estimation de ces taux de transition requiert une connaissance phénoménologique importante. Lorsqu'aucune valeur ne sera disponible nous la prendrons égale à 1, c'est-à-dire la valeur maximale de l'état de dégradation, ce qui entraînera :

- une maximisation des durées du phénomène et du scénario,
- une imprécision sur la durée du phénomène et donc celle du scénario, qui peut être importante et ne sera pas évaluée.

Afin de pallier ce problème, il est nécessaire d'exploiter, dans la mesure de leur disponibilité, des données temporelles relatives au groupe de phénomènes englobant les phénomènes dont les taux de transition sont inconnus.

3) Evaluation de la durée d'un phénomène

Définition

Dans un objectif d'évaluation de la durée Du^j d'un scénario Sc_j, nous considérons que la durée Du^j d'un phénomène Ph_i, inclus dans ce scénario, est égale au laps de temps séparant sa d*ate d'amorce* et sa *date de réalisation*.

Remarque : cette durée est donc distincte de la durée que met le phénomène Ph_i pour se terminer ; elle lui est en effet inférieure ou égale.

Démarche

Pour un phénomène Ph_i fixé, sa durée est obtenue en :

- déterminant pour chaque donnée élaborée (état de dégradation en fonction du temps), la durée correspondant à la valeur d'atteinte de l'état de dégradation égale à τ_i,
- unifiant ces durées, selon la méthode de traitement décrite au I.2.3-d.

Remarque : de par la démarche d'unification des données, la durée d'un phénomène est donnée sous forme d'un domaine de valeurs, noté δDu_i.

Illustration

Ce principe d'obtention de la durée d'un phénomène est illustré à la figure 30.

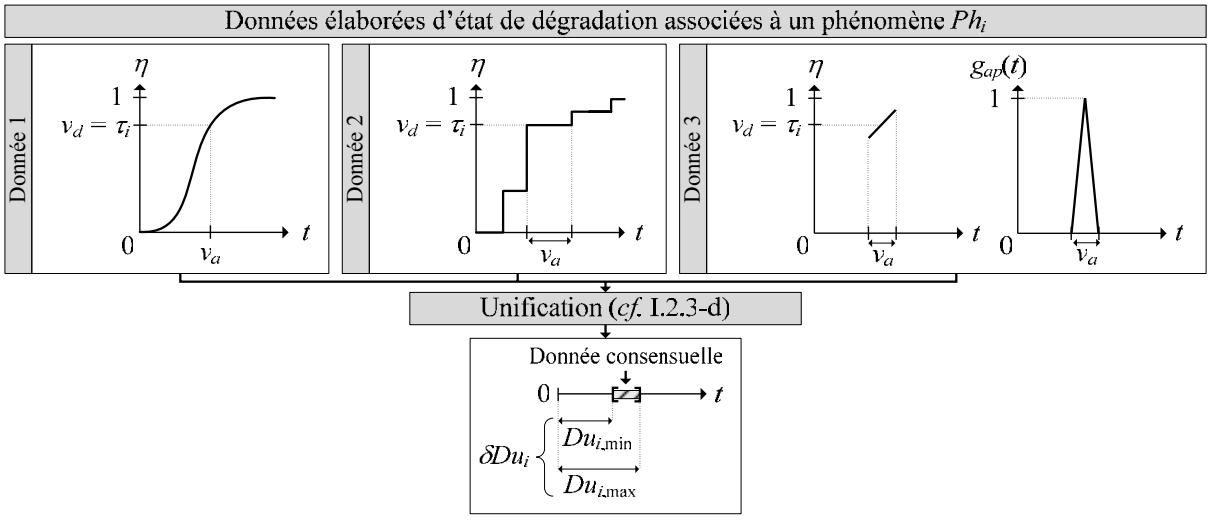


Figure 30 : Principe d'obtention de la durée d'un phénomène

b) Evaluation de la durée d'un scénario

Définition

La durée d'un scénario correspond à la somme des durées des phénomènes le composant. Pour un scénario Sc_j comportant n phénomènes, nous avons :

$$Du^j = \sum_{i=1}^{n} Du_i \quad \textbf{[23]}$$

Démarche

La démarche présentée ici correspond à une agrégation des données du niveau des phénomènes à celui du scénario ; elle consiste, pour un scénario Sc_j composé de n phénomènes, à obtenir sa durée en :

- évaluant les durées de ses n phénomènes,
- appliquant l'équation [23].

L'indicateur de qualité que nous associons à ce résultat est une masse de croyance déduite des probabilités de Smets $P(\delta Du_i)$ associées aux phénomènes du scénario considéré (obtenues par la procédure d'unification des données).
La procédure d'unification, pour chaque phénomène, donne une donnée consensuelle sous forme d'un intervalle et sa probabilité de Smets. Nous pouvons alors transformer cet intervalle de durée en un sous-ensemble flou rectangulaire de hauteur égale à la valeur de probabilité de Smets, afin d'appliquer la formule d'addition de sous-ensembles flous [BOU, 95], pour obtenir l'indicateur de qualité $m(\delta Du^j)$ associé à la durée d'un scénario ; il est tel que :

$$m(\delta Du^j) = \min_{i=1,\ldots,n}\left(P(\delta Du_i)\right) \quad \textbf{[24]}$$

c) Evaluation de la probabilité d'apparition d'un phénomène

Définition

La probabilité d'apparition d'un phénomène peut être définie comme la probabilité que ce phénomène démarre sur une période d'observation [t_0 ; t_f] et se poursuive jusqu'à sa date de réalisation.

La date t_f de fin d'observation est fixée par l'utilisateur ; elle peut être égale à la première date de réalisation des scénarii, à la durée de vie de conception du produit ou de l'ouvrage.

Remarque : nous utilisons le terme « probabilité d'apparition » même si rigoureusement il ne s'agit pas toujours d'une probabilité.

Démarche

Nous proposons deux approches de quantification de la probabilité d'apparition d'un phénomène :

1. collecte puis unification des données de probabilité d'apparition,
2. estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène sur la base des résultats de l'analyse qualitative (*cf.* IV.1) et de l'analyse quantitative temporelle (*cf.* IV.2).

1) Collecte et unification des données de probabilité d'apparition

Dans une approche fréquentielle, les données de probabilité d'apparition des phénomènes sont déduites de l'observation de leur fréquence d'apparition ; elles correspondent à des données de retour d'expérience.
Les données collectées sont ensuite traitées selon la démarche présentée au paragraphe I.2, afin d'obtenir une donnée consensuelle et la probabilité de Smets associée.

Remarque : nous rappelons que la probabilité de Smets et la probabilité d'apparition sont deux notions distinctes :

- la probabilité de Smets d'une donnée consensuelle est un indicateur de la confiance que l'on peut avoir dans le résultat de la fusion de plusieurs données élaborées,
- la probabilité d'apparition d'un phénomène est la probabilité que ce phénomène démarre et se poursuive sur une période d'observation.

Les politiques d'inspection régulière dans le domaine du bâtiment ne sont pas généralisées à tous les produits de construction et tous les types de bâtiment, par conséquent, les données de probabilité d'apparition sont difficilement accessibles.
Afin de pallier ce manque de données nous proposons une méthode d'estimation de la probabilité d'apparition des phénomènes basée sur les résultats obtenus lors des étapes précédentes de la méthodologie.

2) Estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène

Nous considérons que la probabilité d'apparition d'un phénomène dépend de trois facteurs :

- **l'intensité des sollicitations et la nature du contact**, plus la concentration des agents environnementaux et les réactions des composants associés sont importantes plus la probabilité d'apparition est importante. La « nature du contact » décrit la liaison existant entre le composant et le milieu considérés,
- **la qualité de conception**, mieux le produit est conçu et moins le phénomène a de chances de démarrer,
- **la cinétique de dégradation**, plus la cinétique d'un phénomène est rapide plus il a de chance de se réaliser avant les phénomènes des autres scénarii.

Les deux premiers facteurs permettent d'estimer la probabilité qu'un phénomène démarre sur une période d'observation $[t_0 ; t_f]$ et le troisième facteur vise à estimer la probabilité que ce phénomène perdure jusqu'à sa date de réalisation.

Nous proposons d'estimer la probabilité d'apparition d'un phénomène à l'aide de deux indicateurs associés à ces trois facteurs :

- l'indicateur de démarrage de ce phénomène – $I\xi_i^D$,
- l'indicateur de cinétique relative de ce phénomène – $I\xi_i^C$.

① Indicateur de démarrage – $I\xi_i^D$

Cet indicateur de démarrage se décompose en :

- un indicateur d'environnement – $I\xi_i^{D1}$
- un indicateur de conception – $I\xi_i^{D2}$

Indicateur d'environnement - $I\xi_i^{D1}$

Cet indicateur est lié à l'intensité des sollicitations des agents environnementaux et à la nature du contact entre composant et milieu considérés pour le phénomène Ph_i.

La concentration des agents environnementaux influe sur les réactions des entités géométriques (matériaux, composants, produits). Des études menées en Europe, au États-Unis et au Canada [JER, 04] ont permis de déterminer les corrélations existant entre ces deux paramètres ; elles se nomment les « dose-response functions » et ont été présentées en première partie de ce mémoire. Ces fonctions ont été obtenues pour certains matériaux de construction, tels des métaux, des pierres et des revêtements peints, en exposition in situ en mesurant à la fois la concentration des agents environnementaux et les dégradations de ces matériaux.
En analysant la forme de ces « dose-response functions » et faute de données pour l'ensemble des produits de construction, nous faisons l'hypothèse que la fonction reliant les concentrations aux réactions est exponentielle.

L'analyse qualitative du produit (IV.1) nous renseigne sur la nature du contact existant entre les agents environnementaux et le composant considéré, il peut être direct ou indirect. Un contact indirect signifie qu'il existe un composant faisant « barrière » ou agissant comme un « filtre » entre les agents environnementaux et le composant considéré. Cette « barrière » permet donc de réduire l'influence de ces agents environnementaux.

De ces deux aspects, « dose-response functions » et nature du contact, nous proposons un indicateur de démarrage, $I\xi_i^{D1}$; les valeurs linguistiques correspondant à chaque paire {intensité des sollicitations ; nature du contact} sont présentées dans le tableau 22.

Intensité des sollicitations et nature du contact (composant / milieu)	$I\xi_i^{D1}$
{ intensité *très importante* ; contact *direct* }	Très important
{ intensité *très importante* ; contact *indirect* } ou {intensité *importante* ; contact *direct* }	Important
{ intensité *importante* ; contact *indirect* } ou { intensité *normale* ; contact *direct* }	Moyen
{ intensité *normale* ; contact *indirect* }	Faible

Tableau 22 : Table d'estimation de l'indicateur d'environnement

Remarque : les trois intensités de sollicitations (très importante, importante et normale) utilisées dans le tableau 22 sont développées au paragraphe II.1.

Indicateur de conception - $I\xi_i^{D2}$

Cet indicateur est lié à la qualité de conception du produit et de ses composants vis-à-vis du phénomène Ph_i.

Une méthode d'évaluation de la propension à la fiabilité des produits de construction (metodo per la valutazione della propensione all affidabilità) a été développée et est fréquemment utilisée en Italie. Nous détaillons en annexe 7 cette méthode proposée dans [REJ, 95] et [REJ, 99].
Elle permet de fournir une évaluation qualitative, sur [0 ; 100], du risque de défaillance d'un produit de construction à partir de quatre indicateurs :

- **la fiabilité fonctionnelle** : elle est basée sur le fait que plus les fonctions que doit assurer le produit sont réparties sur l'ensemble des composants, plus l'ensemble des composants participent et donc que chaque composant subit moins de fatigue. C'est une analyse fonctionnelle du produit qui permet d'évaluer cette fiabilité ;
- **la fiabilité d'exécution** : elle évalue la probabilité d'exécution correcte du produit en phase de mise en œuvre par rapport à ce qui a été prévu à la conception ;
- **la fiabilité inhérente** : elle correspond à l'évaluation des risques de défaillances dues aux différences de comportement des composants sollicités par les agents environnementaux (telles que l'humidité et la température), ces différences étant liées aux propriétés inhérentes aux différents composants ;
- **la fiabilité de comptabilité** : elle est basée sur l'évaluation des incompatibilités chimique et physique entre les composants du produit.

Dans cette méthode, la valeur globale de propension à la fiabilité est égale à la moyenne des valeurs prises par chacun de ces indicateurs.

L'évaluation de ces indicateurs est basée sur un modèle fonctionnel du produit, qui est construit à partir d'une grille de fonctions analytiques regroupées en fonctions de base définies pour certains types de produit de construction (mur, plancher, toiture terrasse) ; la construction de ce modèle fonctionnel est détaillé dans [MAG, 98]. Les fonctions proposées dans cette grille sont principalement associées à des exigences thermiques, acoustiques et hydriques des produits de construction.

L'utilisation de cette méthode ici nécessiterait de l'adapter aux fonctions que nous proposons (présentées dans la base de données des fonctions – *cf.* II.2) ; de plus, l'application de cette méthode requiert un temps de calcul non négligeable, ce qui alourdirait l'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène. C'est la raison pour laquelle, nous proposons d'estimer l'indicateur lié à la qualité de conception à partir des quatre sous-critères (évalués sur une échelle comportant quatre valeurs linguistiques) présentés dans le tableau 23, qui s'inspirent des indicateurs de la méthode d'évaluation de la propension à la fiabilité.

$I\xi_i^{D2-1}$		$I\xi_i^{D2-2}$		$I\xi_i^{D2-3}$		$I\xi_i^{D2-4}$	
Complexité structurelle du composant lié à Ph_i		Complexité fonctionnelle du composant lié à Ph_i		Phase de réalisation du composant lié à Ph_i		Cohérence du composant lié à Ph_i vis-à-vis du lieu d'implantation du produit	
Très importante	*D*	Très importante	*D*	Sur chantier	*D*	Pauvre	*D*
Importante	*C*	Importante	*C*	Majorité sur chantier	*C*	Faible	*C*
Moyenne	*B*	Moyenne	*B*	Majorité en usine	*B*	Correcte	*B*
Faible	*A*	Faible	*A*	En usine	*A*	Complète	*A*

Tableau 23 : Table d'estimation des sous-indicateurs liés à la qualité de conception

La couche basse émissivité d'un vitrage, de part la complexité de sa réalisation a une valeur de complexité structurelle plus importante qu'un béton de fondation coulé en pleine fouille ; par contre la valeur du sous-indicateur « phase de réalisation » est plus faible pour la couche basse émissivité réalisée en usine que pour le béton de fondation coulé sur chantier.

Un composant qui assure une majeure partie des fonctions principales d'un produit a une valeur de complexité fonctionnelle plus importante qu'un composant n'assurant qu'une seule fonction secondaire. Par exemple, une toiture terrasse implantée dans une région à fort taux d'enneigement a une valeur de « cohérence vis-à-vis de l'implantation du produit » beaucoup plus faible qu'une toiture conçue spécialement pour des régions de montagne.

Nous définissons un deuxième indicateur de probabilité d'apparition $I\xi_i^{D2}$, lié à la qualité de conception du produit, par l'équation suivante :

$$I\xi_i^{D2} = \min\left(I\xi_i^{D2-1}; I\xi_i^{D2-2}; I\xi_i^{D2-3}; I\xi_i^{D2-4}\right) \quad \textbf{[25]}$$

Par exemple, un phénomène Ph_i ayant pour évaluations de ses sous-critères de conception $I\xi_i^{D2-1} = A$, $I\xi_i^{D2-2} = B$, $I\xi_i^{D2-3} = C$, $I\xi_i^{D2-4} = A$, aura un indicateur de conception égal à C.

Obtention de l'indicateur de démarrage – $I\xi_i^{D}$

A partir de l'indicateur d'environnement et de l'indicateur de conception nous définissons un indicateur de démarrage d'un phénomène qui représente la probabilité que ce phénomène démarre sur une période d'observation [t_0 ; t_f] ; il est exprimé à l'aide des valeurs linguistiques détaillées dans le tableau 24.

		Indicateur d'environnement			
		Très important	Important	Moyen	Faible
Indicateur de conception	D	D	D	C	C
	C	D	D	C	B
	B	C	C	B	A
	A	C	B	A	A

Tableau 24 : Indicateur de démarrage d'un phénomène

② Indicateur de cinétique relative – $I\xi_i^{C}$

Cet indicateur est lié à la cinétique de dégradation d'un phénomène Ph_i comparée à celle des scénarii dans lequel il est impliqué.

Nous proposons d'évaluer cette cinétique par comparaison aux durées des Sc_j (l'analyse quantitative temporelle, *cf.* IV.2, nous permettant d'avoir au mieux la durée de tout phénomène). La durée du phénomène Ph_i est comparée à la plus grande durée parmi les durées de tous les scénarii identifiés.
Après avoir appliqué l'analyse qualitative (IV.1) à plusieurs produits de construction, nous avons constaté que les scénarii étaient en moyenne composés de trois à quatre phénomènes ; nous avons alors fixé les bornes des classes de cinétique de telle sorte que la durée de trois ou quatre phénomènes de cinétique moyenne représente la durée du scénario le plus long.

Nous proposons cinq intervalles de cinétique, dont les bornes se chevauchent, auxquelles sont associées les cinq valeurs linguistiques prises par l'indicateur de cinétique ; elles sont présentées dans le tableau 25 (t_0 et t_f ont été définies précédemment).

Valeurs de la classe	$I\xi_i^{③}$
[0 ; 1,1·(t_f - t_0) / 20]	Très rapide
[0,9·(t_f - t_0) / 20 ; 3,1·(t_f - t_0) / 20]	Rapide
[2,9·(t_f - t_0) / 20 ; 7,1·(t_f - t_0) / 20]	Moyenne
[6,9·(t_f - t_0) / 20 ; 12,1·(t_f - t_0) / 20]	Lente
[11,9·(t_f - t_0) / 20 ; (t_f - t_0)]	Très lente

Tableau 25 : Table d'estimation de l'indicateur de cinétique

La cinétique d'un Ph_i est considérée « très rapide » si son domaine de durée δDu_i est inclus dans l'intervalle [0 ; 1,1·(t_f – t_0) / 20]. Lorsque δDu_i est réparti sur deux intervalles de cinétique, alors Ph_i appartient à l'intervalle incluant la majeure partie de δDu_i.

Déduction de la probabilité d'apparition d'un phénomène – ξ_i

A partir de l'indicateur de démarrage et de l'indicateur de cinétique nous estimons la probabilité d'apparition d'un phénomène sur une période d'observation [t_0 ; t_f] ; il est exprimé à l'aide des quatre valeurs linguistiques présentées dans le tableau 26.

		Indicateur de cinétique				
		Très rapide	Rapide	Moyenne	Lente	Très lente
Indicateur de démarrage	D	Très important	Très important	Très important	Important	Faible
	C	Très important	Très important	Important	Faible	Faible
	B	Très important	Important	Important	Faible	Très faible
	A	Important	Important	Faible	Très faible	Très faible

Tableau 26 : Table d'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène

Résultat

Nous proposons deux approches de quantification de la probabilité d'apparition d'un phénomène ; le choix entre ces deux approches est conditionné par la disponibilité des données fréquentielles de retour d'expérience.
Les tables d'estimation des indicateurs (d'environnement, de conception, de démarrage et de cinétique) proposées dans la seconde approche nécessitent d'être calées à partir de données collectées afin de pouvoir passer des valeurs linguistiques à des valeurs numériques.

d) Evaluation de la probabilité d'apparition d'un scénario

Définition

La probabilité d'apparition – ξ^j – d'un scénario Sc_j (composé de n phénomènes Ph_i) dépend de la probabilité – ξ_i – de ses phénomènes constitutifs.

Hypothèse : nous faisons l'hypothèse, pour simplifier le problème, que les phénomènes sont indépendants les uns des autres.
Nous obtenons alors :

$$\xi^j = \prod_{i=1}^{n} \xi_i \qquad \textbf{[26]}$$

Démarche

La probabilité d'apparition d'un scénario est obtenue en déterminant la probabilité d'apparition de ses phénomènes constitutifs (*cf.* I.3.2-c) puis en appliquant l'équation [26]. Cette démarche correspond à une agrégation (passage des *PI* au *PO*).
Cette agrégation est directe lorsque les probabilités d'apparition des phénomènes sont obtenues par collecte puis unification (première approche), par contre elle nécessite au préalable la transformation des valeurs linguistiques en valeurs numériques lorsque ces probabilités d'apparition sont obtenues par estimation (deuxième approche).

Remarque : lorsque les probabilités d'apparition des phénomènes sont obtenues par unification, nous disposons des probabilités de Smets associées à ces résultats ; dans ce cas la démarche d'obtention de la probabilité de Smets associée à la probabilité d'apparition d'un scénario est identique à celle associée à la date de réalisation d'un scénario (*cf.* I.3.2-b).

e) Gestion des interactions entre scénarii

Définition – problématique (rappel)

Nous définissons une interaction entre scénarii comme le fait que plusieurs scénarii peuvent avoir des phénomènes en commun ; par conséquent un phénomène Ph_i peut avoir plusieurs phénomènes antérieurs Ph_{i-1} qui doivent tous être réalisés pour qu'il démarre (relation en « ET ») ou qu'au moins l'un d'eux doit être réalisé pour qu'il démarre (relation en « OU »).
A l'inverse un scénario indépendant est un scénario ne présentant aucune interaction avec d'autres scénarii.

A partir du graphe fourni par l'analyse qualitative d'un produit (*cf.* IV.1) puis caractérisé (durée et probabilité d'apparition des phénomènes et des scénarii) par les étapes a) à d) de cette méthode, nous cherchons à identifier les scénarii qui ont le plus de chance de se réaliser, ce qui revient à gérer les interactions entre scénarii et ainsi à construire un ensemble des scénarii indépendants.

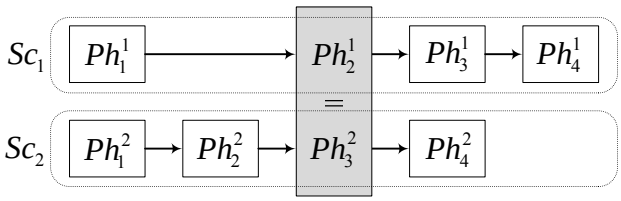
Démarche

La gestion des interactions entre scénarii d'un graphe consiste à parcourir de gauche à droite l'ensemble des scénarii (scénario par scénario et phénomène par phénomène), à déterminer à chaque interaction l'arc à retenir, puis à évaluer la ou les durée(s) et la ou les probabilité(s) d'apparition du(des) scénario(i) indépendant(s) résultant(s). Deux cas peuvent se présenter, lorsque l'interaction est une :

1. relation en « ET »,
2. relation en « OU ».

Remarque : nous parcourons le graphe de gauche à droite dans la mesure où il est construit à partir d'une méthode inductive partant des phénomènes initiaux jusqu'aux phénomènes finaux et qui est bâti conventionnellement de gauche à droite.

Nous illustrons notre démarche à l'aide des deux scénarii, Sc_1 et Sc_2, présentés à la figure 31. Les scénarii Sc_1 et Sc_2 comprennent chacun quatre phénomènes, respectivement de Ph_1^1 à Ph_4^1 et de Ph_1^2 à Ph_4^2, et ils ont le phénomène Ph_2^1 / Ph_3^2 en commun.



	Sc_1				Sc_2			
	Ph_1^1	Ph_2^1	Ph_3^1	Ph_4^1	Ph_1^2	Ph_2^2	Ph_3^2	Ph_4^2
Durée de réalisation (ans)	[2 ; 3]	[3 ; 4]	[1 ; 2]	[4 ; 6]	[1 ; 3]	[2 ; 3]	[3 ; 4]	[2 ; 4]
Probabilité d'apparition	0,6	[0,2 ; 0,3]	[0,4 ; 0,5]	[0,4 ; 0,5]	[0,2 ; 0,3]	0,7	[0,2 ; 0,3]	0,2

Figure 31 : Illustration de deux scénarii ayant un phénomène en commun

1) Relation en « ET »

Obtention de l'arc à retenir

Lorsque l'interaction est une relation en « ET », il faut que les phénomènes juste antérieurs au phénomène commun (Ph_1^1 et Ph_2^2 pour l'exemple de la figure 31) soient réalisés pour que le phénomène commun démarre. L'arc retenu sera donc celui qui a la durée la plus grande.

Remarque : les durées et éventuellement les probabilités d'apparition des phénomènes étant données sous forme de domaines de valeurs, nous comparons les moyennes de ces domaines.

Pour l'exemple de la figure 31, nous avons 2,5 (Ph_1^1) inférieur à 4,5 (arc Ph_1^2 – Ph_2^2) si l'on compare les moyennes des δDu^j des phénomènes antérieurs à Ph_2^1 / Ph_3^2, par conséquent l'arc retenu sera celui composé des phénomènes Ph_1^2 et Ph_2^2.
Nous obtenons alors deux scénarii indépendants :

- $Sc_1^\circ : Ph_1^2 - Ph_2^2 - Ph_2^1 / Ph_3^2 - Ph_3^1 - Ph_4^1$,
- $Sc_2^\circ : Ph_1^2 - Ph_2^2 - Ph_2^1 / Ph_3^2 - Ph_4^2$.

Evaluation des durées des scénarii indépendants résultants
Les durées des scénarii indépendants sont obtenues en appliquant la démarche détaillée au I.3.2-b.

Pour l'exemple de la figure 31, nous obtenons :

- Sc_1° : $\delta Du^1 = \left[Du_{\min}^1 ; Du_{\max}^1\right]$ = [1 + 2 + 3 + 1 + 4 ; 3 + 3 + 4 + 2 + 6] = [11 ; 18] ans,
- Sc_2° : δDu^2 = [8 ; 14] ans.

Evaluation des probabilités d'apparition des scénarii indépendants résultants
Les probabilités d'apparition des scénarii indépendants sont obtenues en appliquant la démarche explicitée au I.3.2-d. Dans ce cas la probabilité du phénomène commun est conditionnée par l'ensemble des arcs antérieurs liés par la relation « ET », par conséquent la probabilité d'apparition de ce phénomène commun sera égal au produit des probabilités de l'ensemble des phénomènes inclus dans ces arcs antérieurs et de sa propre probabilité.
Pour l'exemple de la figure 31, nous avons :

- Sc_1° : $\delta\xi^1 = \left[\xi_{\min}^1 ; \xi_{\max}^1\right]$ = [0,6*0,2*0,7*0,2*0,4*0,4 ; 0,6*0,3*0,7*0,3*0,5*0,5] = [0,003 ; 0,009],
- Sc_2° : $\delta\xi^2$ = [0,003 ; 0,008].

2) Relation en « OU »

Obtention de l'arc à retenir
Lorsque l'interaction est une relation en « OU », il faut qu'au moins l'un des phénomènes juste antérieurs au phénomène commun soient réalisés pour que le phénomène commun démarre. L'arc retenu sera donc celui qui a la plus forte probabilité d'apparition.

Remarque : les probabilités d'apparition des arcs antérieurs sont obtenues en appliquant la démarche d'agrégation détaillée au I.3.2-d.

Pour l'exemple de la figure 31, nous avons 0,6 (probabilité d'apparition de Ph_1^1) supérieur à 0,175 (moyenne du domaine de probabilité d'apparition de l'arc $Ph_1^2 - Ph_2^2$, [0,2*0,7 ; 0,3*0,7]), par conséquent l'arc retenu sera celui composé du phénomène Ph_1^1. Nous obtenons alors deux scénarii indépendants :

- $Sc_1^\circ : Ph_1^1 - Ph_2^1 / Ph_3^2 - Ph_3^1 - Ph_4^1$,
- $Sc_2^\circ : Ph_1^1 - Ph_2^1 / Ph_3^2 - Ph_4^2$.

Evaluation des durées des scénarii indépendants résultants
La démarche d'évaluation est identique à celle pour les relations en « ET ».
Pour l'exemple de la figure 31, nous obtenons :

- Sc_1° : δDu^1 = [10 ; 15] ans,
- Sc_2° : δDu^2 = [7 ; 11] ans.

Evaluation des probabilités d'apparition des scénarii indépendants résultants
Les probabilités d'apparition des scénarii indépendants sont obtenues en appliquant la démarche explicitée au I.3.2-d. Dans le cas d'une relation en « OU », la probabilité d'apparition du phénomène commun n'est conditionnée que par l'arc antérieur qui a été retenu ; donc la probabilité d'apparition de ce phénomène commun sera égal au produit des probabilités des phénomènes constitutifs de l'arc retenu et de sa propre probabilité.

Pour l'exemple de la figure 31, nous avons :

- Sc_1° : $\delta\xi^1 = [\xi_{1,\min} ; \xi_{2,\max}]$ = [0,6*0,2*0,4*0,4 ; 0,6*0,3*0,5*0,5] = [0,019 ; 0,045],
- Sc_2° : $\delta\xi^2$ = [0,024 ; 0,036].

I.3.3. Synthèse de la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario

La méthode d'évaluation de la durée d'un scénario que nous proposons se décompose en quatre étapes :

- l'évaluation de la durée d'un phénomène par unification des données temporelles collectées en ce point d'évaluation,
- passage du niveau du phénomène à celui du scénario par agrégation, pour l'obtention de la durée d'un scénario,
- évaluation de la probabilité d'apparition des phénomènes puis des scénarii par unification des données de probabilité collectées ou estimation de ces probabilités s'il n'y a pas de données disponibles,
- gestion des interactions entre scénarii pour obtenir un ensemble de scénarii indépendants (non en interaction), leurs durées et leurs probabilités d'apparition.

Nos apports essentiels, vis-à-vis de cette méthode sont :

- l'utilisation de données collectées au niveau des phénomènes pour obtenir les durées et probabilités au niveau des scénarii (démarche d'agrégation et taux de transition),
- l'association d'un indicateur de qualité à chaque résultat, traduisant la confiance que l'on peut avoir en ce résultat,
- l'estimation des probabilités d'apparition des phénomènes lorsque les données de probabilité sont indisponibles, insuffisantes ou de mauvaise qualité,
- la prise en compte des interactions entre scénarii.

I.4. Méthode d'évaluation de la criticité

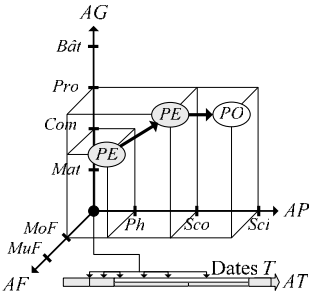
Données entrantes	Données sortantes	Positionnement dans l'*EE*	Etape de la méthodologie
• Résultats de l'*AQL* • Résultats de l'*AQT*	Liste hiérarchisée des scénarii classés à criticité majeure		*AQC* (analyse quantitative de la criticité)

Tableau 27 : Encadré de la méthode d'évaluation de la criticité

I.4.1. Notations, principe et utilisation de la méthode d'évaluation de la criticité

Notations

Les notations utilisées dans cette méthode d'évaluation de la criticité sont les suivantes :

- G^j : gravité d'un Sc_j,
- $I_{RP}Ph_i$: impact d'un Ph_i sur la robustesse du produit,
- $I_{RP}Sc_j$: impact d'un Sc_j sur la robustesse du produit,
- $I_{MP}Sc_j$: impact de Sc_j sur la maintenabilité du produit,
- $C_{MP-r}Sc_j$: critère *r* d'estimation de l'impact de Sc_j sur la maintenabilité du produit,
- $I_{RO}Sc_j$: impact de Sc_j sur la robustesse de l'ouvrage,
- $C_{RO-r}Sc_j$: critère *r* d'estimation de l'impact de Sc_j sur la robustesse de l'ouvrage,
- $I_{MO}Sc_j$: impact de Sc_j sur la maintenabilité de l'ouvrage,
- $C_{MO-r}Sc_j$: critère *r* d'estimation de l'impact de Sc_j sur la maintenabilité de l'ouvrage,
- $I_{RMSP}Sc_j$: impact de Sc_j sur la résistance mécanique et la stabilité d'un produit,
- CDu^j : critère de durée d'un Sc_j,
- $pCDu^j$: poids associé au critère de durée d'un Sc_j,
- $p\xi^j$: poids associé au critère de probabilité d'apparition d'un Sc_j,
- Cr^j : criticité d'un Sc_j,
- $Se_{\xi,1}$, $Se_{\xi,2}$: seuils de criticité supérieur et inférieur associés à ξ^j,
- $Se_{Du,1}$, $Se_{Du,2}$: seuils de criticité supérieur et inférieur associés à Du^j,
- $Se_{G,1}$, $Se_{G,2}$: seuils de criticité supérieur et inférieur associés G^j.

Principe

L'objectif de la méthode d'évaluation de la criticité est de classer les scénarii de dégradation par classes de criticité puis de hiérarchiser les plus critiques.

Nous concluons de l'analyse bibliographique présentée en première partie de ce mémoire, que la criticité (Cr^j) d'un scénario Sc_j dépend de trois facteurs (critères) :

- la probabilité d'apparition de ce scénario : ξ^j,
- la durée de ce scénario : Du^j,
- la gravité de ce scénario : G^j.

Nous proposons d'évaluer la criticité d'un scénario Sc_j par une combinaison, notée ⊗, de ces trois critères ; elle est formalisée ainsi :

$$Cr^j = \xi^j \otimes Du^j \otimes G^j \quad \textbf{[27]}$$

Nous considérons trois classes de criticité, qui par similitude avec la terminologie employée par [DES, 03], sont nommées :

- criticité majeure ;
- criticité significative ;
- criticité mineure.

La première classe regroupe des scénarii qui sont jugés inacceptable tandis que les deux autres englobent des scénarii plus ou moins acceptables. Nous faisons l'hypothèse que les concepteurs et gestionnaires de systèmes constructifs géreront en priorité les scénarii dont la criticité est majeure, c'est-à-dire qu'ils prévoiront les inspections, maintenances et réparations pour prévenir ou corriger les conséquences de ces scénarii.

La méthode que nous proposons utilise les résultats de l'analyse quantitative temporelle, c'est-à-dire la connaissance des scénarii indépendants, leur durée et leur probabilité d'apparition.

Utilisation dans la méthodologie

Cette méthode d'évaluation de la criticité sera appliquée lors de l'étape d'analyse quantitative de la criticité de la méthodologie (*cf.* IV.3). Seuls les scénarii classés à « criticité majeure » sont utilisés dans la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles (*cf.* I.5) et à l'étape d'analyse quantitative des performances de la méthodologie (*cf.* IV.4).

I.4.2. Détail de la méthode d'évaluation de la criticité

La méthode d'évaluation de la criticité comprend trois étapes :

a) évaluation de la gravité d'un scénario,
b) classement des scénarii indépendants,
c) hiérarchisation des scénarii à criticité majeure.

a) Evaluation de la gravité d'un scénario

Définition

La gravité est une évaluation des conséquences de chaque scénario sur les performances fonctionnelles du produit de construction.

Principe

La Directive Produits de Construction [CST, 93] définit six exigences essentielles que les produits de construction doivent respecter pendant « une durée de vie raisonnable du point de vue économique » :

1. résistance mécanique et stabilité,
2. sécurité en cas d'incendie,
3. hygiène, santé et environnement,
4. sécurité d'utilisation,
5. protection contre le bruit,
6. économies d'énergie et isolation thermique.

Nous considérons qu'un scénario est d'autant plus grave qu'il entraîne un non respect de ces exigences. Les six critères globaux d'évaluation de la gravité sont donc ces six exigences essentielles.
La détermination de l'ensemble des critères globaux pertinents pour l'évaluation de la gravité requiert une compétence importante dans l'ensemble des disciplines du domaine de la construction couvertes par ces exigences.
Nous avons donc centré notre recherche sur l'exigence « résistance mécanique et stabilité » pour laquelle l'analyse qualitative (IV.1) fournit une somme d'information conséquente.

En faisant un parallèle avec le domaine industriel, les performances d'un système industriel sont évaluées à partir de quatre critères : sa fiabilité, sa maintenabilité, sa disponibilité et sa sécurité (FMDS). Dans notre contexte, la sécurité est prise en compte dans les exigences « sécurité en cas d'incendie » et « sécurité d'utilisation ».
La fiabilité est définie dans [LAS, 01] comme l'aptitude de la machine à produire le plus longtemps possible, sans arrêt pour cause de pannes. La maintenabilité correspond, selon [LAS, 01], à l'aptitude de la machine à être dépannée rapidement. Enfin, la disponibilité est, selon [LAS, 01], l'aptitude d'un dispositif à être en état de fonctionner dans des conditions données.

Dans le contexte de la construction, un scénario peut avoir un impact sur lui-même et sur son environnement qui est composé : de l'ouvrage dans lequel il est intégré, de l'environnement « atmosphérique » et des tiers. Les deux dernières composantes de l'environnement (environnement « atmosphérique » et tiers) sont évaluées dans les exigences deux, trois et quatre.
De plus la maintenabilité et la disponibilité sont deux notions intimement liées : un produit qui est réparé rapidement sera plus disponible qu'un produit qui nécessitera une réparation longue. Ces deux notions se renforcent mais ne permettent pas d'améliorer la comparaison entre plusieurs scénarii lors de l'évaluation de leur gravité.
En se basant sur la FMDS, nous proposons quatre critères pour évaluer la gravité d'un scénario Sc_j liée à l'exigence « résistance mécanique et stabilité » :

1. $I_{RP}Sc_j$: impact sur la robustesse du produit,
2. $I_{MP}Sc_j$: impact sur la maintenabilité du produit,
3. $I_{RO}Sc_j$: impact sur la robustesse de l'ouvrage,
4. $I_{MO}Sc_j$: impact sur la maintenabilité de l'ouvrage.

Démarche

Chaque critère ($I_{RP}Sc_j$, $I_{MP}Sc_j$, $I_{RO}Sc_j$, $I_{MO}Sc_j$) est évalué à l'aide de sous-critères pour lesquels nous proposons des grilles d'évaluation.

Pour le critère d'impact d'un scénario sur la robustesse du produit, l'évaluation est d'abord réalisée au niveau de ses phénomènes constitutifs. Les trois autres évaluations sont réalisées directement au niveau du scénario.

Tous les sous-critères étant évalués sur [0 ; 1], les quatre critères d'évaluation de l'exigence « résistance mécanique et stabilité » prennent leur valeur sur [0 ; 1]. Les sous-critères et les grilles d'évaluation de ces quatre critères sont présentés dans les paragraphes I.4.2-b-1 à I.4.2-b-4 ; puis l'évaluation du critère global « résistance mécanique et stabilité » est détaillée au paragraphe I.4.2-b-5.

1) Critère d'impact sur la robustesse du produit – $I_{RP}Sc_j$

La robustesse d'un produit caractérise sa capacité à maintenir ses performances fonctionnelles à un niveau acceptable tout au long de sa vie en œuvre ; elle est donc liée à l'ensemble des fonctions et des performances attendues par l'utilisateur. Cette notion de niveau acceptable est détaillée au paragraphe I.5 de cette partie B.
Nous considérons que la robustesse d'un produit est d'autant plus affectée qu'un scénario a un impact sur une fonction jugée très importante par l'utilisateur de notre méthodologie.
L'évaluation de cet impact comprend cinq étapes :

- étape 1 : classement des fonctions d'un produit et de ses composants,
- étape 2 : évaluation du « degré de participation » des composants à ces fonctions,
- étape 3 : évaluation de l'impact d'un phénomène sur ces fonctions,
- étape 4 : évaluation de l'impact d'un phénomène sur la robustesse du produit,
- étape 5 : évaluation de l'impact d'un scénario sur la robustesse du produit.

Etape 1 : Classement des fonctions d'un produit et de ses composants
L'analyse fonctionnelle, étape de l'analyse qualitative (IV.1), détermine l'ensemble des fonctions assurées par un produit et ses composants.
Nous cherchons alors à classer qualitativement ces fonctions par ordre d'importance. Nous proposons quatre classes : « essentielle », « très importante », « importante » et « peu importante ». Nous préférons un classement à une hiérarchisation, dans la mesure où plusieurs fonctions peuvent être jugées de même importance. Une hiérarchisation des fonctions semble donc peu réaliste.
Ce classement est réalisé une seule fois pour toute l'analyse de la criticité d'un produit.

Etape 2 : Evaluation du « degré de participation » des composants aux fonctions
Cette évaluation est déduite de l'analyse fonctionnelle du produit. Une fonction, par exemple l'étanchéité thermique d'un mur composé de briques, de laine de verre et d'enduits, peut être assurée par plusieurs composants. Cependant les propriétés mécano-physico-chimiques de chaque composant font qu'ils n'ont pas tous la même capacité pour remplir cette fonction. Le « degré de participation » permet d'estimer cette capacité. Dans l'exemple précédent, la laine de verre aura un degré de participation élevé, alors que celui de l'enduit sera faible.
Nous proposons les trois « degrés de participation » suivants : « élevé », « moyen » et « faible ».

La démarche d'évaluation du « degré de participation » consiste à affecter un « degré de participation » à chaque couple {composant, fonction}.
Ces évaluations doivent éventuellement être réalisées plusieurs fois dans la mesure ou l'analyse qualitative est basée sur une démarche itérative. A chaque itération de l'analyse des

modes de défaillances et de leurs effets (AMDE), il est nécessaire de valider et parfois de modifier les analyses structurelle et fonctionnelle du produit. Par conséquent, les degrés de participation peuvent également être modifiés. Cette notion d'itération est développée dans le paragraphe IV.1.

Remarque : un scénario est construit à partir d'une série d'itérations de l'AMDE, un phénomène est donc associé à une itération particulière ; c'est la raison pour laquelle l'évaluation des « degrés de participation » est menée au niveau du phénomène.

Etape 3 : Evaluation de l'impact d'un phénomène sur les fonctions
Cette évaluation permet d'estimer qualitativement la perte de performance fonctionnelle liée à un phénomène. Elle pourrait être évaluée quantitativement à partir de l'analyse quantitative des performances (I.5 et IV.4), mais l'objectif de l'analyse de la criticité est de réduire le nombre de scénarii à considérer pour l'analyse des performances.
En tout état de cause, à l'issue de l'analyse des performances, il sera possible de confirmer ou d'infirmer les évaluations réalisées à cette étape, mais uniquement pour les scénarii classés « à criticité majeure », c'est-à-dire ceux retenus pour l'analyse des performances.

Nous proposons quatre classes d'impact : « fort », « moyen », « faible » et « négligeable ».
Un phénomène peut affecter plusieurs fonctions, c'est la raison pour laquelle cette évaluation doit être réalisée pour chaque couple {phénomène, fonction}.

Etape 4 : Evaluation de l'impact d'un phénomène sur la robustesse d'un produit
Nous proposons d'évaluer l'impact $I_{RP}Ph_i(F_k)$ d'un couple {fonction F_k ; phénomène Ph_i} sur la robustesse d'un produit à l'aide d'une grille d'évaluation combinant les résultats des trois étapes précédentes ; elle est présentée au tableau 28.

	Classe fonctionnelle											
	Essentielle			Très importante			Importante			Peu importante		
Classe d'impact	Degré de participation											
	Élevé	Moyen	Faible	Élevé	Moyen	Faible	Élevé	Moyen	Faible	Élevé	Moyen	Faible
Fort	1,00	0,90	0,80	0,85	0,75	0,65	0,70	0,60	0,50	0,55	0,45	0,35
Moyen	0,90	0,80	0,70	0,75	0,65	0,55	0,60	0,50	0,40	0,45	0,35	0,25
Faible	0,80	0,70	0,60	0,65	0,55	0,45	0,50	0,40	0,30	0,35	0,25	0,15
Négligeable	0,70	0,60	0,50	0,55	0,45	0,35	0,40	0,30	0,20	0,25	0,15	0,00

Tableau 28 : Grille d'évaluation du critère d'impact d'un phénomène sur la robustesse du produit

Hypothèse : nous avons fixé arbitrairement les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus, elles n'ont pas été validées et nécessitent de l'être (ce qui est une perspective à ces travaux de thèse).

L'impact d'un phénomène Ph_i sur la robustesse du mur $I_{RP}Ph_i$ est ensuite pris égal à :

$$I_{RP}Ph_i = \underset{k}{moy}\left(I_{RP}Ph_i(F_k)\right) \quad \textbf{[28]}$$

Etape 5 : Evaluation de l'impact d'un scénario sur la robustesse d'un produit
L'impact d'un scénario Sc_j sur la robustesse du produit, $I_{RP}Sc_j$, est déduit de l'impact de ses phénomènes constitutifs $I_{RP}Ph_i$ par la formule suivante :

$$I_{RP}Sc_j = \underset{i}{moy}\left(I_{RP}Ph_i\right) \quad \textbf{[29]}$$

Ce type d'agrégation ne permet pas de rendre compte des écarts, parfois importants, d'impact de certains phénomènes par rapport aux autres. Cependant, elle permet d'éviter qu'un scénario ait un impact important sur la robustesse du produit uniquement parce qu'il est composé d'un grand nombre de phénomènes.

2) Critère d'impact sur la maintenabilité du produit – $I_{MP}Sc_j$

Par similitude avec la définition de la maintenabilité d'un système industriel et en prenant en compte le contexte de la construction, nous considérons qu'un produit de construction est d'autant plus maintenable que les opérations de maintenance à entreprendre suite à la réalisation d'un scénario sont facilement et rapidement exécutables et à moindre coût.
L'impact d'un scénario sur la maintenabilité du produit est évalué à partir des quatre sous-critères suivants :

- la **détectabilité** des conséquences du scénario : plus elles sont facilement détectables, plus le produit est aisément maintenable ;
- l'**accessibilité** de ces conséquences : un produit est d'autant plus maintenable que ses dégradations sont facilement accessibles. La nécessité d'utiliser une nacelle peut par exemple engendrer une moins bonne accessibilité ;
- la **dissociabilité** des composants ou du produit : un radiateur électrique est par exemple plus facilement maintenable, du point de vue de sa dissociabilité, qu'un mur porteur ;
- les **coûts** directs et indirects engendrés par les opérations de maintenance. Les coûts directs correspondent aux prix des composants ou du produit, de la main d'œuvre, alors que les coûts indirects représentent les coûts de non exploitation du produit.

Les évaluations associées à ces quatre sous-critères sont définies dans le tableau 29.

Sous-critères		Valeurs prises par les sous-critères			
		1	2/3	1/3	0
$C_{MP-1}Sc_j$	Détectabilité	Non détectable	Détectable par instrumentation	Détectable visuellement	Facilement détectable visuellement
$C_{MP-2}Sc_j$	Accessibilité	Non accessible	Accessible à l'aide d'un équipement conséquent	Accessible avec peu d'équipement	Accessible sans équipement
$C_{MP-3}Sc_j$	Dissociabilité	Non dissociable	Difficilement dissociable	Partiellement dissociable	Totalement dissociable
$C_{MP-4}Sc_j$	Coûts	Très important	Assez important	Important	Peu important

Tableau 29 : Grille d'évaluation du critère d'impact d'un scénario sur la maintenabilité du produit

Nous considérons que ces quatre sous-critères ont la même influence sur le critère d'impact d'un scénario sur la maintenabilité d'un produit, nous prenons donc ce critère égal à la moyenne des évaluations obtenues pour chaque sous-critère.
Remarques : si un utilisateur considère qu'un ou plusieurs sous-critères ont une influence plus importante que les autres, il est possible de les pondérer. Cette pondération devra cependant rester fixe tout au long de l'étude pour ne pas fausser la classification de l'ensemble des scénarii.
Afin de réaliser une évaluation plus fine de l'impact sur la maintenabilité d'un produit, il est possible de définir l'ensemble des opérations de maintenance nécessaires à la résolution des conséquences d'un scénario et d'en définir le prix. Cette démarche peut cependant être très longue à réaliser. Si l'objectif de l'utilisateur est de définir une stratégie de maintenance, il semble plus pertinent de définir les opérations de maintenance, à l'issue de l'analyse de la criticité (IV.3), uniquement pour les scénarii jugés à « criticité majeure ».

3) Critère d'impact sur la robustesse de l'ouvrage – $I_{RO}Sc_j$

Nous évaluons qualitativement l'impact d'un scénario sur les performances fonctionnelles de l'ouvrage. Il peut être difficile de réaliser cette évaluation sans connaître précisément les fonctions assurées par l'ouvrage. Cependant, nous proposons quatre types de partie d'ouvrage (structure, enveloppe, second œuvre et équipements) et faisons l'hypothèse que les principales fonctions assurées par chacun de ces types sont proches.

L'impact sur la robustesse de l'ouvrage est alors estimée à partir de deux sous-critères : la **nature** de la partie d'ouvrage dégradée et l'**ampleur** de cet impact. La description de ces deux sous-critères et les évaluations associées sont détaillées dans le tableau 30 :

		Valeurs prises par les sous-critères			
Sous-critères		1	2/3	1/3	0
$C_{RO_1}Sc_j$	Nature	Structure de l'ouvrage	Enveloppe de l'ouvrage	Second œuvre de l'ouvrage	Équipement de l'ouvrage
$C_{RO_2}Sc_j$	Ampleur	Très importante	Importante	Peu importante	Négligeable

Tableau 30 : Grille d'évaluation du critère d'impact d'un scénario sur la robustesse de l'ouvrage

Nous prenons l'impact d'un scénario sur la robustesse de l'ouvrage égal à la moyenne des évaluations de ces deux sous-critères.

Remarque : L'utilisateur peut éventuellement pondérer ces critères s'il considère qu'un sous-critère influence plus cet impact que l'autre.

4) Critère d'impact sur la maintenabilité de l'ouvrage – $I_{MO}Sc_j$

Cet impact estime qualitativement l'ampleur de la maintenance à réaliser sur l'ouvrage engendrée par la maintenance du produit lui-même. Nous proposons d'évaluer cet impact sur la base de deux sous-critères : la **dissociabilité** du produit de l'ouvrage et les **coûts** directs et indirects engendrés par cette ou ces opérations de maintenance. La grille d'évaluation de ces deux sous-critères est présentée dans le tableau 31 :

		Valeurs prises par les sous-critères			
Sous-critères		1	2/3	1/3	0
$C_{MO_1}Sc_j$	Dissociabilité	Non dissociable	Difficilement dissociable	Partiellement dissociable	Totalement dissociable
$C_{MO_2}Sc_j$	Coûts	Très important	Assez important	Important	Peu important

Tableau 31 : Grille d'évaluation du critère d'impact d'un scénario sur la maintenabilité de l'ouvrage

Comme pour l'impact sur la maintenabilité du produit, cette évaluation, moyenne des évaluations des deux sous-critères, pourrait être affinée en déterminant précisément les opérations de maintenance à réaliser. Cette évaluation nécessite cependant d'avoir une connaissance précise de la composition structurelle de l'ouvrage. Il semble donc plus pertinent de la mener si l'étude est réalisée au niveau de l'ouvrage. L'analyse structurelle serait alors déjà effectuée.

5) Critère global « résistance mécanique et stabilité » – $I_{RMSP}Sc_j$

L'évaluation de l'impact d'un scénario Sc_j sur la « résistance mécanique et la stabilité » d'un produit, $I_{RMSP}Sc_j$, consiste à agréger les quatre critères définis dans les paragraphes précédents.

Nous considérons que ces quatre critères ont la même influence sur la « résistance mécanique et la stabilité » d'un produit ; le critère global est alors égal à :

$$I_{RMSP}Sc_j = \frac{I_{RP}Sc_j + I_{MP}Sc_j + I_{RO}Sc_j + I_{MO}Sc_j}{4} \quad \textbf{[30]}$$

Remarque : l'utilisateur peut choisir de pondérer les quatre critères s'il considère qu'un ou plusieurs de ces critères ont plus d'influence que les autres sur le critère global.

Dans la mesure où actuellement seule la démarche d'évaluation du critère global « résistance mécanique et stabilité » a été définie, parmi les six critères globaux à prendre en considération dans l'évaluation de la gravité d'un scénario, nous proposons de prendre la gravité G^j d'un scénario Sc_j égale au critère global $I_{RMSP}Sc_j$.

b) Classement des scénarii indépendants

Principe

Nous proposons de classer les scénarii indépendants dans les trois classes de criticité définies précédemment (« criticité majeure », « criticité significative » et « criticité mineure », *cf.* I.4.1) par comparaison de leur valeur de probabilité d'apparition, de durée et de gravité à des seuils de criticité.

Démarche

La démarche de classement des scénarii indépendants comprend deux étapes :

1. la détermination des seuils de criticité,
2. l'affectation d'une classe de criticité à chaque scénario.

1) Détermination des seuils de criticité

Nous classons les scénarii dans trois classes selon trois critères, il est donc nécessaire de définir six seuils de criticité ; ils sont détaillés dans le tableau 32 :

Classes / Critères	Risques critiques	Seuils	Risques significatifs	Seuils	Risques mineurs
Probabilité d'apparition	$\xi^j \geq Se_{\xi,1}$	$Se_{\xi,1}$	$Se_{\xi,1} > \xi^j \geq Se_{\xi,2}$	$Se_{\xi,2}$	$Se_{\xi,2} > \xi^j$
Durée	$Du^j \leq Se_{Du,1}$	$Se_{Du,1}$	$Se_{Du,1} < Du^j \leq Se_{Du,2}$	$Se_{Du,2}$	$Se_{Du,2} < Du^j$
Gravité	$G^j \geq Se_{G,1}$	$Se_{G,1}$	$Se_{G,1} > G^j \geq Se_{G,2}$	$Se_{G,2}$	$Se_{G,2} > G^j$

Tableau 32 : Seuils de criticité

Un scénario sera d'autant plus critique qu'il combinera une probabilité d'apparition élevée, une durée courte et une gravité élevée. Les seuils présentés dans le tableau 32 sont fixés de telle sorte que :

- $1 \geq Se_{\xi,1} > Se_{\xi,2} \geq 0$,
- $t_0 \leq Se_{Du,1} < Se_{Du,2} \leq t_f$,
- $1 \geq Se_{G,1} > Se_{G,2} \geq 0$.

Remarque : la durée et la probabilité d'apparition étant souvent données sous forme de domaine de valeur, nous comparerons la moyenne de ces domaines ($moy(\delta Du^j)$ et $moy(\delta\xi^j)$) aux seuils de criticité.

Ces seuils doivent être fixés par l'utilisateur, ils ne devront pas changer au cours d'une analyse de la criticité afin de comparer l'ensemble des scénarii sur une même base, mais ils peuvent varier d'une étude à l'autre.

2) Affectation d'une classe de criticité à chaque scénario

Nous proposons d'affecter une classe de criticité à chaque scénario d'un ensemble de *n* scénarii en appliquant la formule suivante :

$$\text{Classe de } Sc_j = \min \{\text{Classe de } Sc_j \text{ pour } \xi^j \text{ ; Classe de } Sc_j \text{ pour } Du^j \text{ ; Classe de } Sc_j \text{ pour } G^j\} \quad \textbf{[31]}$$

Illustration

Nous illustrons cette démarche par le classement des quatre scénarii présentés au tableau 33 en considérant les seuils de criticité suivants : $\{Se_{\xi,1}$; $Se_{Du,1}$; $Se_{G,1}$; $Se_{\xi,2}$; $Se_{Du,2}$; $Se_{G,2}\}$ = {0,08 ; 8 ans ; 0,7 ; 0,04 ; 16 ans ; 0,5}.

	Probabilité d'apparition	Durée	Gravité	Classe de criticité
Scénario 1	[0,07 ; 0,09]	[5 ; 6] ans	0,75	majeure
Scénario 2	[0,01 ; 0,02]	[14 ; 15] ans	0,40	mineure
Scénario 3	[0,05 ; 0,06]	[12 ; 14] ans	0,62	significative
Scénario 4	[0,08 ; 0,09]	[7 ; 8] ans	0,80	majeure

Tableau 33 : Exemple illustratif du classement de quatre scénarii

Remarque : les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus ne sont pas réelles, elles n'ont qu'un but d'illustration.

c) Hiérarchisation des scénarii à criticité majeure

Principe

La hiérarchisation des scénarii classés à criticité majeure selon trois critères (probabilité d'apparition, durée et gravité) s'apparente à une problématique d'analyse multicritère.

Nous avons sélectionné la méthode d'analyse multicritère la mieux adaptée à notre problématique à l'aide de l'arbre de décision proposé par S. Lemaire [LEM, 06]. Cet arbre a été construit par une analyse des principales méthodes d'analyse multicritère existantes et permet de sélectionner une ou plusieurs méthodes à partir d'une succession de questions (problématique, détermination des poids, nature des critères, nature de la méthode, risques de compensation, etc.).

A la première question « problématique ? » nous répondons : le rangement ; elle semble en effet la mieux adaptée à notre problématique de hiérarchisation des scénarii si l'on considère la définition proposée par [ROY, 85] : « la problématique du rangement consiste à poser le problème en termes de rangement des actions de *A* (ensemble des actions possibles) ou de certaines d'entre elles, c'est-à-dire à orienter l'investigation vers la mise en évidence d'un classement défini sur un sous-ensemble de *A* ».

Nous répondons par l'affirmative à la deuxième question « détermination des poids ? », c'est-à-dire que nous affectons un poids à chaque critère ; leur mode d'obtention est développé dans la suite de ce paragraphe.

A la question « nature des critères ? » nous répondons « vrai-critères » dans la mesure où nos trois critères satisfont l'équation suivante (définition d'un vrai critère selon [ROY, 85]) :

$$g(a') \geq g(a) \Rightarrow \begin{cases} a' I_g a & \text{si} \quad g(a') = g(a) \\ a' P_g a & \text{si} \quad g(a') > g(a) \end{cases} \quad \textbf{[32]}$$

où :

- *a* et *a'* : actions, c'est-à-dire des scénarii dans notre contexte,
- *g*(*a*) et *g*(*a'*) : évaluations de *a* et *a'*, c'est-à-dire la probabilité d'apparition, la durée ou la gravité dans notre contexte,
- I_g et P_g : relation d'indifférence et de préférence.

Nous acceptons le risque de compensation (dernière question) entre évaluations des critères, c'est-à-dire par exemple qu'un scénario ayant une gravité très importante pourra avoir une criticité importante même si sa probabilité d'apparition est peu importante et sa durée longue. Nous formulons cette hypothèse dans la mesure où nous n'avons pas de moyens permettant d'affirmer le contraire.

Cet arbre de décision nous conduit à trois types de méthodes (MAUT, HAP et modèles additifs et multiplicatifs), nous choisissons alors le produit pondéré qui offre l'avantage d'être le plus facilement mis en œuvre.

Nous prenons la criticité d'un scénario égale au produit pondéré des trois critères « probabilité d'apparition », « durée » et « gravité ». Nous hiérarchisons alors les scénarii par ordre de criticité (le scénario le plus critique étant celui qui a la criticité la plus élevée).

Démarche

La démarche de hiérarchisation des scénarii à criticité majeure comprend trois étapes :

1. évaluation des critères,
2. détermination des poids,
3. calcul de la criticité.

1) Evaluation des critères

Afin d'appliquer le produit pondéré, il est nécessaire que les trois critères soient évalués sur une même échelle et de même sens, c'est-à-dire que si l'on considère par exemple une échelle [0 ; 1] il faut que pour tous les critères « 0 » soit la valeur la plus faible et « 1 » la plus élevée.

La probabilité d'apparition (*cf.* I.3.2-d) et la gravité (*cf.* I.4.2-a) d'un scénario sont évalués sur une échelle [0 ; 1] « croissante », c'est-à-dire qu'un scénario ayant une probabilité d'apparition égale à 0 diminuera la valeur de la criticité alors que si elle est égale à 1 sa criticité augmentera. Par contre, la durée d'un scénario est évaluée sur une échelle [t_0 ; t_f] « décroissante », c'est-à-dire qu'une durée courte augmentera la criticité du scénario associé.
Nous avons choisi de modifier uniquement l'échelle d'évaluation associée au critère de durée CDu^j, afin de minimiser les opérations à effectuer, pour qu'elle soit égale à [0 ; 1] et soit « croissante », c'est-à-dire identique à celle associée aux critères de probabilité d'apparition et de gravité.
Nous proposons alors que les valeurs du critère « durée » suivent l'équation suivante :

$$CDu^j = \frac{t_f - moy(\delta Du^j)}{t_f - t_0} \quad \textbf{[33]}$$

2) Détermination des poids

La pondération est généralement utilisée en analyse multicritère pour refléter l'importance accordée par le décideur à chaque critère. Dans notre contexte, nous proposons d'utiliser cette pondération pour représenter la croyance que l'on peut accorder aux données obtenues (critères de probabilité d'apparition, de durée et de gravité).
Nous distinguons deux cas :

- cas 1 : données résultant de la méthode de traitement des données élaborées (*cf.* I.2),
- cas 2 : données estimées ou déclarées.

Cas 1 : données résultant de la méthode de traitement des données élaborées
La croyance en une donnée obtenue par la méthode de traitement des données élaborées (*cf.* I.2) est fournie par sa probabilité de Smets ; c'est le cas pour :

- la durée d'un scénario,
- la probabilité d'apparition d'un scénario (si l'on utilise la première approche d'évaluation, *cf.* I.3.2-c-1).

Cas 2 : données ne résultant pas de la méthode de traitement des données élaborées
Hypothèse : nous fixons arbitrairement ici la croyance égale à 0,5 ; ce qui nous semble être un bon compromis entre une sous-estimation et une surestimation de cette croyance, par conséquent de la valeur de la criticité associée au scénario considéré et donc de l'ordre de hiérarchisation de l'ensemble des scénarii.

Ce cas englobe :

- la gravité d'un scénario,
- la probabilité d'apparition d'un scénario obtenue par estimation (*cf.* I.3.2-c-2),
- la durée d'un scénario lorsqu'elle est déclarée.

Nous établissons les valeurs des poids associés aux critères pour qu'ils répondent aux trois conditions suivantes :

- un scénario est d'autant plus critique que sa valeur de criticité est élevée,
- une augmentation de la croyance en un critère doit augmenter la prépondérance de ce critère par rapport aux autres,
- les poids doivent être normés.

Remarque : les deux premières conditions résultent de nos choix alors que la troisième est fixée par la méthode du produit pondéré.

Nous obtenons alors les formules des poids associés aux critères (pour le cas 1) présentées dans le tableau 34.

Poids du critère de probabilité d'apparition – $p\xi^j$	Poids du critère de durée – $pCDu^j$	Poids du critère de gravité – pG^j
$\frac{1-P(\delta\xi^j)}{(1-P(\delta\xi^j))+(1-P(\delta Du^j))+0,5}$	$\frac{1-P(\delta Du^j)}{(1-P(\delta\xi^j))+(1-P(\delta Du^j))+0,5}$	$\frac{0,5}{(1-P(\delta\xi^j))+(1-P(\delta Du^j))+0,5}$

Tableau 34 : Poids des critères de criticité

Remarque : dans le cas 2, $p(\delta\xi^j)$ et/ou $P(\delta Du^j)$ sont remplacés par 0,5.

3) Calcul de la criticité

Nous proposons d'obtenir la criticité d'un scénario en appliquant l'équation (produit pondéré) suivante :

$$Cr^j = \left(\xi^j\right)^{p\xi^j} \times \left(CDu^j\right)^{pCDu^j} \times \left(G^j\right)^{pG^j} \quad \textbf{[34]}$$

Il est alors possible de hiérarchiser les scénarii par ordre de criticité, le scénario le plus critique étant celui qui a la criticité la plus élevée.

Remarque : ξ^j est remplacé par $moy\left(\delta\xi^j\right)$ dans l'équation [34] lorsque la probabilité d'apparition est donnée sous forme d'un domaine de valeurs (cas 1 du I.4.2-c-2).

Illustration :

Nous illustrons cette méthode de hiérarchisation des scénarii classés à criticité majeure par ordre de criticité à partir des quatre scénarii du tableau 35, avec $\{t_0 ; t_f\} = \{2 ; 50\}$ ans.

	$\xi^j / \delta\xi^j$	$P\left(\delta\xi^j\right)$	$Du^j / \delta Du^j$	$P\left(\delta Du^j\right)$	G^j
Scénario 1	[0,08 ; 0,11]	0,46	8 ans	-	0,28
Scénario 2	[0,04 ; 0,06]	0,63	[5 ; 6] ans	0,23	0,52
Scénario 3	0,21	-	[7 ; 12] ans	0,16	0,43
Scénario 4	0,12	-	[3 ; 4] ans	0,58	0,76

Tableau 35 : Présentation de quatre scénarii fictifs à criticité majeure

Remarque : les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus ne sont pas réelles, elles n'ont qu'un but d'illustration.

En appliquant les formules présentées dans le tableau 34, nous obtenons les valeurs de poids suivantes :

	$p\xi^j$	$pCDu^j$	pG^j
Sc_1	$\frac{1-0,46}{(1-0,46)+0,5+0,5} = 0,350$	$\frac{0,5}{(1-0,46)+0,5+0,5} = 0,325$	$\frac{0,5}{(1-0,46)+0,5+0,5} = 0,325$
Sc_2	$\frac{1-0,63}{(1-0,63)+(1-0,23)+0,5} = 0,225$	$\frac{1-0,23}{(1-0,63)+(1-0,23)+0,5} = 0,470$	$\frac{0,5}{(1-0,63)+(1-0,23)+0,5} = 0,305$
Sc_3	$\frac{0,5}{0,5+(1-0,16)+0,5} = 0,272$	$\frac{1-0,16}{0,5+(1-0,16)+0,5} = 0,456$	$\frac{0,5}{0,5+(1-0,16)+0,5} = 0,272$
Sc_4	$\frac{0,5}{0,5+(1-0,58)+0,5} = 0,352$	$\frac{1-0,58}{0,5+(1-0,58)+0,5} = 0,296$	$\frac{0,5}{0,5+(1-0,58)+0,5} = 0,352$

Tableau 36 : Poids associés aux scénarii du tableau 35

Nous déduisons des équations [33], [34] et des résultats du tableau 36, les valeurs de criticité suivantes :

- Sc_1 : $Cr^1 = 0,095^{0,350} \times [(50-8)/(50-2)]^{0,325} \times 0,28^{0,325} = 0,29$,
- Sc_2 : $Cr^2 = 0,05^{0,225} \times [(50-5,5)/(50-2)]^{0,470} \times 0,52^{0,305} = 0,40$,
- Sc_3 : $Cr^3 = 0,21^{0,272} \times [(50-9,5)/(50-2)]^{0,456} \times 0,43^{0,272} = 0,48$,
- Sc_4 : $Cr^4 = 0,12^{0,352} \times [(50-3,5)/(50-2)]^{0,296} \times 0,76^{0,352} = 0,42$.

Nous obtenons alors la hiérarchisation suivante (par ordre de criticité décroissante) : $Sc_3 – Sc_4 – Sc_2 – Sc_1$.

I.4.3. Synthèse de la méthode d'évaluation de la criticité

Nous proposons une méthode d'évaluation de la criticité en trois étapes :

- évaluation de la gravité des scénarii,
- classement des scénarii par classes de criticité,
- hiérarchisation des scénarii par ordre de criticité.

Nos apports vis-à-vis des méthodes d'évaluation de la criticité existant dans le domaine industriel sont :

- *les sous-critères d'évaluation de la gravité* : nous considérons la gravité comme une mesure du non respect par le produit des six exigences essentielles de la directive produits de construction. Nous avons centré notre recherche sur l'exigence de « résistance mécanique et stabilité » que nous estimons à l'aide des impacts d'un scénario sur la robustesse d'un produit, sur la maintabilité d'un produit, sur la robustesse d'un ouvrage et sur la maintenabilité d'un ouvrage ;
- *la formulation de la criticité* : nous considérons la criticité égale au produit des critères de probabilité d'apparition, de durée et de gravité de ce scénario pondéré par la croyance que l'on peut accorder aux valeurs prises par ces critères ;
- *la succession classement et hiérarchisation* : nous préférons classer les scénarii avant de hiérarchiser ceux à criticité majeure pour limiter les risques de compensation possibles du fait de l'utilisation de la méthode du produit pondéré.

I.5. Méthode d'évaluation des performances fonctionnelles

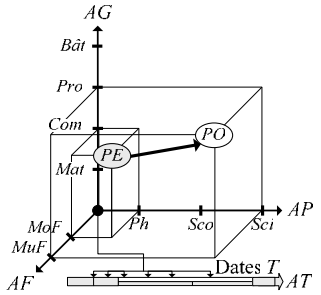
Données entrantes	Données sortantes	Positionnement dans l'*EE*	Etape de la méthodologie
• Résultats de l'*AQL* • Résultats de l'*AQT* • Résultat de l'*AQC* • Caractéristiques intrinsèques • Niveaux de performance	Profil multi-performance		*AQP* (analyse quantitative des performances)

Tableau 37 : Encadré de la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles

I.5.1. Notations, principe et utilisation de la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles

Notations

Nous rappelons que la notion de dégradation d'une entité géométrique est associée aux propriétés mécano-physico-chimiques de cette entité, alors que la notion de défaillance se rattache au niveau de performance des fonctions assurées par un produit et ses composants. Un produit sera défaillant lorsqu'au moins l'un de ses niveaux de performance aura atteint un seuil de défaillance (valeur particulière d'un niveau de performance).

Les notations utilisées dans la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles sont les suivantes :

- F_k : fonction k assurée par un produit ou par l'un de ses composants, l'une des fonctions d'un vitrage est par exemple « être transparent »,
- μ_i^k : niveau de performance d'une F_k associée à un Ph_i, c'est une mesure de l'aptitude de F_k à être remplie,
- μ_{seuil}^k : seuil de défaillance d'une F_k, valeur particulière du niveau de performance de F_k pour laquelle elle est défaillante,
- κ_i^k : caractéristique intrinsèque associée à un Ph_i et à une F_k, elle permet de mesurer l'évolution d'un niveau de performance. La transmittance est par exemple une caractéristique intrinsèque permettant de mesurer le niveau de performance de la fonction « être transparent » d'un vitrage.

Principe

L'objectif de la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles est d'obtenir à une date fixée de la période d'observation ($[t_0 ; t_f]$) les niveaux de performance d'un produit.

Le principe de la méthode que nous proposons est présenté à la figure 32.

Etape 1	Obtention de la fonction de niveau de performance (μ_i^k) d'une F_k associée à Ph_i (*cf.* 1.5.2-a)
Etape 2	Détermination pour chaque {F_k ; date fixée} du μ^k correspondant (*cf.* 1.5.2-b)
Etape 3	Définition des combinaisons entre fonctions (F_k) (*cf.* 1.5.2-c)
Etape 4	Obtention du profil multi-performance (*cf.* 1.5.2-d)

Figure 32 : Principe de la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles

Rappel : nous considérons ici uniquement l'ensemble des scénarii classés à criticité majeure obtenus à l'issue de l'analyse quantitative de la criticité (*cf.* IV.3).

Utilisation dans la méthodologie

La méthode d'évaluation des performances fonctionnelles est utilisée lors de la quantification des performances fonctionnelles d'un produit et de ses composants, c'est-à-dire à l'étape d'analyse quantitative des performances de la méthodologie (*cf.* IV.4).

I.5.2. Détail de la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles

a) Obtention de la fonction de niveau de performance associée au {F_k ; Ph_i}

Principe

L'objectif de cette étape est de modéliser la liaison existant entre la dégradation mécano-physico-chimique d'une entité géométrique et la perte de performance de la ou des fonction(s) assurée(s) par cette entité.

La méthode que nous proposons s'appuie d'une part sur la démarche « classique » en évaluation de la durabilité des matériaux de mesure de l'évolution de la ou des caractéristique(s) intrinsèque(s) d'un matériau et d'autre part sur l'utilisation de données multi-sources.

La démarche « classique » d'évaluation de la durabilité des matériaux, telle qu'expliquée et appliquée dans [JER, 04], [CAR, 04] et [DAN, 05], consiste à :

- identifier la caractéristique intrinsèque (également nommée indicateur de dégradation) que l'on souhaite étudier, par analyse des sollicitations environnementales et des mécanismes de dégradation connus du matériau,
- mesurer par expérimentations (test en vieillissement accéléré et test en vieillissement naturel) de l'évolution de cette caractéristique intrinsèque dans le temps,
- corréler les résultats obtenus par les deux types de tests pour évaluer la durée de vie du matériau.

Démarche

La démarche d'obtention de la fonction de niveau de performance associée au couple $\{F_k ; Ph_i\}$ que nous proposons se décompose en quatre étapes :

1. identification de la caractéristique intrinsèque associée à une F_k,
2. collecte des données de caractéristique intrinsèque,
3. passage d'une caractéristique intrinsèque à un niveau de performance,
4. unification des données de performance fonctionnelle multi-sources.

1) Identification de la caractéristique intrinsèque associée à une F_k

Pour chacune des fonctions assurées par le produit ou ses composants (obtenues à l'issue de l'analyse fonctionnelle d'un produit, *cf.* IV.1.2), nous déterminons la ou les caractéristique(s) intrinsèque(s) permettant de mesurer l'évolution de la performance de cette fonction puis, éventuellement, les liens existant entre ces caractéristiques.
Cette détermination, semblable à la démarche « classique » citée ci-avant, est menée à l'aide d'experts en durabilité des matériaux et/ou des réglementations décrivant les procédures de réalisation des tests de vieillissement des matériaux.

2) Collecte des données de caractéristique intrinsèque

Cette étape consiste à collecter l'ensemble des données disponibles d'évolution de caractéristique intrinsèque dans le temps relatives à un triplet {entité géométrique, entité phénoménologique, entité fonctionnelle}. Il s'agira pour l'essentiel de résultats expérimentaux, théoriques (tels que des modélisations / simulations numériques) et des dires d'experts.

Remarque : les données collectées ici sont des données brutes, il sera donc nécessaire d'appliquer la méthode de transformation des données brutes (*cf.* I.1) afin de pouvoir les exploiter lors des étapes suivantes.

3) Passage d'une caractéristique intrinsèque à un niveau de performance

Cette étape consiste à définir la relation existant entre les valeurs prises par une caractéristique intrinsèque et les niveaux de performances de la fonction associée. Afin de pouvoir exploiter à l'étape suivante l'ensemble des fonctions de performances (μ_i^k) disponibles, nous les définissons sur une échelle normalisée ([0 ; 1]).
Cette relation est définie par :

- les valeurs de la caractéristique intrinsèque associées aux valeurs « 0 » et « 1 » de la fonction de performance,
- la fonction reliant les valeurs intermédiaires. Nous considérons qu'il peut exister trois types de fonctions :
  - linéaire, telle que : $\mu_i^k = a \cdot \kappa_i^k + b$,

- supra-linéaire, telle que : $\mu_i^k = a \cdot e^{\left(\kappa_i^k / b\right)} + c$,
- infra-linéaire, telle que : $\mu_i^k = a \cdot \ln\left(b \cdot \kappa_i^k\right) + c$.

Remarque : cette définition, qui s'apparente à l'approche « classique » citée ci-avant, est menée à l'aide d'expert en durabilité des matériaux.

4) Unification des données de performance fonctionnelle multi-sources

Les données de niveau de performances obtenues à l'étape précédente (*cf.* I.5.2-a-3) provenant de différentes sources sont unifiées ici (en appliquant la méthode de traitement des données élaborées, *cf.* I.2) afin d'exploiter au mieux leur complémentarité.

Résultat

A l'issue de cette première étape de la méthode d'évaluation des performances nous disposons pour chaque paire $\{F_k ; Ph_i\}$ de la fonction de niveau de performances associée, μ_i^k .

b) Détermination pour chaque paire { F_k ; date fixée } du μ_i^k correspondant

Principe

Cette étape consiste à rechercher le niveau de performance d'une fonction pour une date fixée, en considérant l'ensemble des scénarii et phénomènes affectant cette fonction.

Démarche

Cette étape se décompose en trois étapes :

sélection du ou des scénarii puis phénomènes afférant à la date fixée,
obtention des états de dégradation des phénomènes sélectionnés,
déduction du niveau de performance.

1) Sélection du ou des scénarii puis phénomènes afférant à la date fixée

En se basant sur la théorie des graphes, comme nous l'avons proposé précédemment (*cf.* I.3.1), il est alors possible de représenter ces scénarii par un graphe composé d'un ensemble de chemins indépendants où les sommets représentent les phénomènes et les arcs les liaisons entre ces phénomènes.

Nous positionnons les sommets sur l'axe du temps, tels qu'un sommet correspond à une date particulière, donc un état de dégradation particulier (que nous prenons égal au taux de transition).

L'étape de sélection consiste ensuite, pour chaque fonction, à repérer les scénarii et phénomènes démarrés avant la date fixée qui affectent la fonction considérée. Nous illustrons cette étape à l'aide des trois scénarii (dont les valeurs d'état de dégradation sont fictives) schématisés à la figure 33.

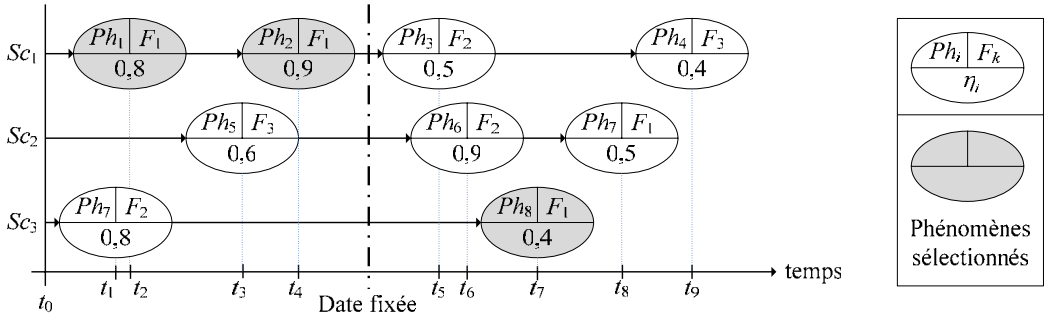


Figure 33 : Illustration de la sélection des* Ph$_i$ *associés à* F$_1$ *et à une date fixée

Si l'on considère la fonction F_1 et la « date fixée » représentée à la figure 33, nous sélectionnons les scénarii Sc_1 et Sc_3 et les phénomènes Ph_1, Ph_2 et Ph_8. Nous ne sélectionnons pas le phénomène Ph_7 puisqu'il démarre à t_6 qui est supérieure à la « date fixée ».

2) Obtention des états de dégradation des phénomènes sélectionnés

Cette étape consiste à obtenir l'état de dégradation correspondant à la date fixée pour chacun des phénomènes sélectionnés précédemment. Nous l'obtenons par unification de l'ensemble des données temporelles disponibles pour ce phénomène.

3) Déduction du niveau de performance

Nous déduisons, dans un premier temps, pour chaque phénomène sélectionné le niveau de performance correspondant à l'état de dégradation obtenu précédemment (*cf.* I.5.2-b-2) à partir de la fonction de niveau de performance évaluée à la première étape (*cf.* I.5.2-a).
Dans un deuxième temps, nous prenons le niveau de performance d'une fonction à une date fixée égal au minimum des niveaux de performance obtenus pour cette fonction et l'ensemble des phénomènes sélectionnés.

Résultat

Nous connaissons pour l'ensemble des fonctions d'un produit (prises indépendamment) leur niveau de performance à une date fixée.

c) Définition des combinaisons entre fonctions (F_k)

Principe

L'objectif de cette étape est de modéliser les combinaisons existant entre les fonctions du produit et de ses composants afin d'obtenir une date de défaillance afférant au comportement global et réaliste du produit au cours du temps.
Par exemple, la fonction de visibilité à travers un vitrage peut être une combinaison de la fonction de transparence et de résistance aux agents environnementaux. Nous définissons les combinaisons entre fonctions afin de prendre en compte le fait que ces deux fonctions ne sont pas défaillantes, mais que globalement la fonction de transparence l'est.
Nous cherchons ainsi à formaliser les liaisons existant entre les niveaux de performance associées aux fonctions d'un produit.

Démarche

La démarche de définition des combinaisons entre fonctions consiste dans un premier temps à identifier les fonctions en liaison puis dans un deuxième temps à formaliser cette liaison. Une liaison sera généralement donnée sous la forme :

$$\alpha_1 \times \mu^1 + \alpha_2 \times \mu^2 + ... + \alpha_n \times \mu^n \geq \mu_{seuil} \quad \textbf{[35]}$$

où les α_i représentent des coefficients tels que :

$$\sum_i \alpha_i = 1 \quad \textbf{[36]}$$

Remarque : nous posons l'équation [36] pour que le niveau de performance d'une combinaison soit évalué sur [0 ; 1] (les niveaux de performance étant eux mêmes évalués sur [0 ; 1]).

C'est à l'utilisateur de définir ces combinaisons et les seuils de défaillance ; il peut s'aider des règlementations existantes, telles que :

- les Eurocodes 0 et 1 pour les combinaisons entre les fonctions de résistance mécanique (compression, traction, flexion, cisaillement, …) [AFN, 04b],
- le classement UPEC pour les revêtements de sol [CST, 05],
- le classement PMC pour les revêtements de sols industriels [CST, 00],
- le classement ACERMI pour les matériaux isolants [CST, 96],
- …

Remarques : nous distinguons deux types de seuils de défaillance :

- ceux relatifs aux fonctions considérées indépendamment les unes des autres,
- ceux relatifs aux combinaisons de fonctions.

Afin d'aider l'utilisateur à réaliser cette étape, les combinaisons entre fonctions et les seuils de défaillance fixés pour chaque étude (produit spécifique) seront capitalisés dans la base de données « performances » (cf. II.5).

Résultat

A l'issue de cette étape, nous disposons de l'ensemble des équations (*cf.* équation [35]) de combinaisons entre fonctions et des seuils de défaillance d'un produit.

d) Obtention du profil multi-performance

Principe

L'objectif de cette étape est d'obtenir une vision globale des niveaux de performances des fonctions d'un produit et de leur combinaison à un instant donné à partir :

- des niveaux de performances obtenus en considérant les fonctions indépendamment les unes des autres (*cf.* I.5.2-b),
- des formalisations des combinaisons entre fonctions (*cf.* I.5.2-c).

Démarche

Les niveaux de performance des fonctions prises indépendamment ont été évalués précédemment, il s'agit donc maintenant d'évaluer le niveau de performance de chaque combinaison de fonctions ; il sera obtenu en remplaçant dans les équations du type de l'équation [35] les niveaux de performances des fonctions indépendantes.

Par exemple, pour $\mu^1 = 0{,}6$ et $\mu^2 = 0{,}4$ à $t_{fixé}$ et la combinaison entre F_1 et F_2 formalisée par l'équation $0{,}8 \times \mu^1 + 0{,}2 \times \mu^2$, le niveau de performance de cette combinaison à $t_{fixé}$ est égal à 0,56.

Résultat

A l'issue de cette étape, nous disposons, pour un produit, de l'ensemble des niveaux de performance de ses fonctions et de leur combinaison, à une date fixée. Ce profil multi-performance sera présenté sous forme de représentation radar des performances (*cf.* III.3).

I.5.3. Synthèse de la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles

Nous proposons une méthode d'évaluation des performances en quatre étapes :

- obtention des fonctions de niveau de performance associées à tous les $\{F_k ; Ph_i\}$,
- déduction des niveaux de performance de chaque F_k à une date fixée,
- définition des combinaisons entre fonction,
- obtention du profil multi-performance à la date fixée.

Nos apports vis-à-vis des méthodes d'évaluation des performances existantes sont :

- l'obtention des niveaux de performance des fonctions d'un produit en partant des états de dégradation des phénomènes de ce produit,
- la prise en compte des combinaisons entre fonctions,
- l'approche multi-performance.

I.6. Synthèse des méthodes

Les cinq modèles développés dans ce chapitre sont des blocs indépendants utilisés à plusieurs reprises dans la méthodologie proposée au quatrième chapitre de cette partie.

La **méthode de transformation d'une donnée brute** en une donnée élaborée permet d'obtenir un format d'exploitation commun à un ensemble de données multi-sources de formats hétérogènes. Cette méthode est utile à l'analyse quantitative temporelle et à l'analyse quantitative des performances.

La **méthode de traitement des données élaborées** permet d'exploiter la complémentarité de données multi-échelles (unification et agrégation) pour obtenir une donnée consensuelle et ses indicateurs de qualité. Elle est utilisée par l'analyse quantitative temporelle et l'analyse quantitative des performances de la méthodologie.

La **méthode d'évaluation de la durée d'un scénario** permet d'obtenir un ensemble de scénarii indépendants, leur durée ainsi que leur probabilité d'apparition à partir de données (temporelles et de probabilités d'apparition, de l'analyse qualitative) afférant aux phénomènes. Cette méthode est en liaison avec l'analyse quantitative temporelle.

La **méthode d'évaluation de la criticité** permet de classer les scénarii indépendants par classes de criticité puis de hiérarchiser ceux classés à criticité majeure par un produit des critères de criticité (probabilité d'apparition, durée, gravité) pondéré par la confiance que l'on peut accorder en leurs évaluations. Elle est liée à l'analyse quantitative de la criticité.

La **méthode d'évaluation des performances fonctionnelles** permet d'obtenir le profil multi-performance d'un produit à un instant de sa vie en œuvre à partir de données phénoménologiques et de caractéristiques intrinsèques à l'échelle du composant. Cette méthode se rattache à l'analyse quantitative des performances.

Chapitre II : Propositions de bases de données

Introduction aux bases de données

Les bases de données sont créées dans un double objectif :

- aider à l'application de la méthodologie,
- capitaliser l'ensemble des informations recueillies au fur et à mesure des études de produits de construction.

Les liens existant entre les cinq bases de données proposées (agents environnementaux, fonctions, phénomènes, probabilités d'apparition et performances) et les étapes de la méthodologie sont présentés à la figure 34.

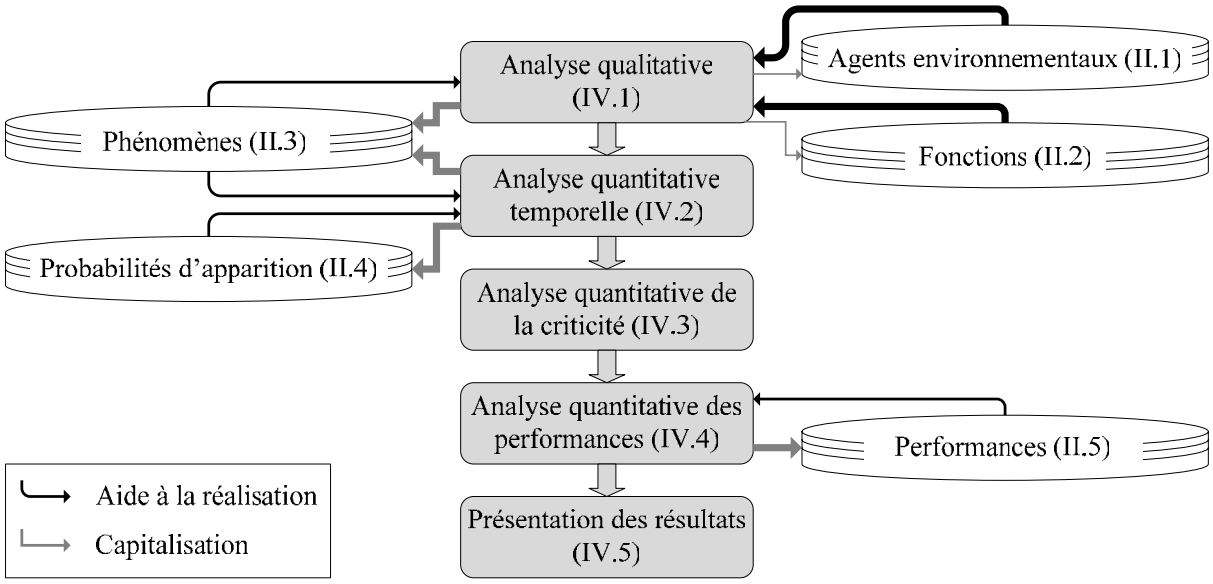


Figure 34 : Liens entre les bases de données et la méthodologie

Remarque : à la figure 34 l'épaisseur des flèches est schématiquement proportionnelle au rôle d'aide et/ou de capitalisation des bases de données.

Pour chacune des bases de données proposées, nous présenterons dans les paragraphes suivants :

- son objectif,
- sa structuration et son contenu,
- son implémentation,
- son utilisation.

II.1. Base de données « agents environnementaux »

II.1.1. Objectif de la base de données « agents environnementaux »

L'objectif de cette base de données est de regrouper l'ensemble des agents environnementaux susceptibles de solliciter les produits de construction au cours du temps afin d'aider à la réalisation de l'analyse qualitative (IV.1) et de l'analyse quantitative temporelle (estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène, *cf.* I.3.2-c-2). Elle est détaillée en annexe 8.

II.1.2. Structuration et contenu de la base de données « agents environnementaux »

Cette base de données comprend quatre champs, contenant des objets textes, intitulés :

a) catégorie environnementale,
b) composante environnementale,
c) unité de mesure,
d) référentiel de classification.

a) Catégorie environnementale

Chaque catégorie environnementale englobe un ensemble de composantes environnementales ayant des propriétés (mécano-physico-chimiques) communes.
Nous distinguons treize classes environnementales : les liquides, les vapeurs, les gaz, l'électricité, l'incendie, la foudre, les radiations, les températures, les animaux et bactéries, les végétaux et champignons, les bruits, les actions mécaniques et les précipitations.

b) Composante environnementale

Le champ « composante environnementale » inclut l'ensemble des agents environnementaux (par exemple, l'eau, les ultra-violets, les efforts de compression) susceptibles de dégrader le produit et ses composants au cours de son cycle de vie.

Remarque : les agents environnementaux contenu dans ce champ sont « élémentaires ». Par conséquent, une sollicitation d'un produit pourra être modélisée par une combinaison d'agents environnementaux. Par exemple, la sollicitation par l'eau chaude d'un circuit hydraulique est modélisée par l'eau et la température élevée.
Cependant, certaines sollicitations requièrent la combinaison d'un grand nombre d'agents environnementaux et sont fréquemment utilisées lors de l'analyse structurelle d'un produit, c'est pourquoi nous avons choisi de les noter comme des agents environnementaux ; il s'agit de la grêle, de la neige, de la pluie et du brouillard (catégorie précipitations) de l'incendie et de la foudre.

c) Unité de mesure

Ce champ décrit les unités du système international (SI) permettant de mesurer les agents environnementaux, tel que le mg/L pour le sulfate dissous.

d) Référentiel de classification

Ce champ inclut les réglementations en vigueur permettant de définir la classe de sollicitations de l'agent environnemental associé ; il est détaillé dans le paragraphe « utilisation de la base de données » (*cf.* II.1.4).

La structuration de cette base de données est schématisée à la figure 35.

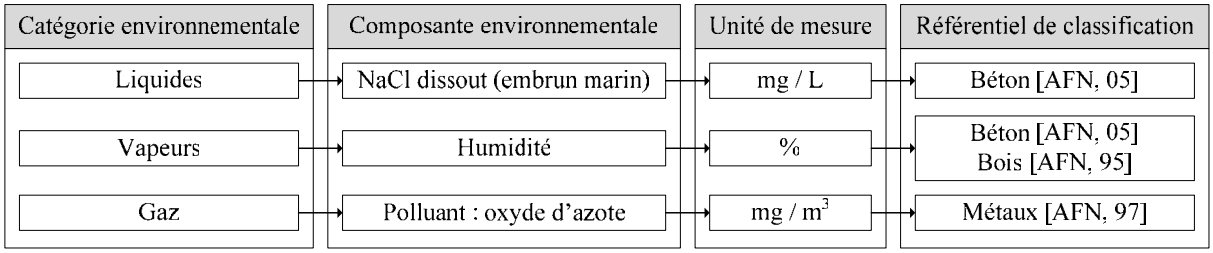


Figure 35 : Structuration de la base de données « agents environnementaux »

II.1.3. Implémentation de la base de données « agents environnementaux »

La base de données des agents environnementaux a été implémentée à partir de réglementations et d'ouvrages relatifs aux agents environnementaux affectant la durabilité des matériaux et produits de construction ; il s'agit principalement de : [ISO, 84], [EOT, 99], [PUC, 86], [LOR, 99], [DER, 90], [EST, 97], [AQC, 01]. Elle contient actuellement quatre-vingt treize agents environnementaux.

II.1.4. Utilisation de la base de données « agents environnementaux »

Cette base de données est utilisée pour aider à :

a) la réalisation de l'analyse structurelle d'un produit (*cf.* IV.1.2),
b) l'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène (*cf.* I.3.2-c-2).

a) Aide à la réalisation de l'analyse structurelle d'un produit

Les milieux d'un produit sont modélisés en sélectionnant dans cette base de données les agents environnementaux et/ou leurs combinaisons pertinents pour l'étude menée.

b) Aide à l'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène

L'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène est basée sur la définition de trois intensités de sollicitations des agents environnementaux : « normale », « importante », « très importante ».

L'impact d'un agent environnemental sur un matériau est lié à sa concentration dans l'environnement, mais également à la nature de ce matériau. Notre démarche consiste ici à indiquer les référentiels afférant à des matériaux permettant d'aider au choix d'une intensité de sollicitation pour une paire {composant ; agent environnemental}.

Remarque : la valeur d'intensité de sollicitations pour une paire {composant ; milieu} est prise égale à l'intensité qui maximise l'ensemble des paires {composant ; agent environnemental}.

Exemple du béton :

La norme NF EN 206-1 [AFN, 05], décrit cinq classes d'environnement à considérer pour le choix d'un béton. Elles sont présentées dans le tableau 38 :

Classe	Environnement
1	Sec
2a	Humide sans gel ou avec un gel faible
$2b_1$	Humide avec gel modéré
$2b_2$	Humide avec gel sévère
3	Humide avec gel modéré ou sévère et produits dégivrants
$4a_1$	Marin immergé (sans gel ou avec gel faible)

Classe	Environnement
$4a_2$	Marin marnage (sans gel ou avec gel faible)
4b	Marin avec gel modéré ou sévère
5a	Faiblement agressif chimiquement (*cf.* NF P18-011 [AFN,92])
5b	Moyennement agressif chimiquement
5c	Fortement agressif chimiquement

Tableau 38 : Classes d'environnement associées au béton

Les classes de gel sévère, modéré et faible sont définies par les conditions suivantes mesurées en moyenne annuelle sur les trente dernières années :

- gel faible : pas plus de 2 jours ayant atteint une température inférieure à -5°C,
- gel sévère : plus de 10 jours ayant atteint une température inférieure à -10°C,
- gel modéré : entre gel faible et gel sévère.

Cette norme considère les classes 1 et 2 comme des environnements courants et les classes 3 à 5 comme des environnements agressifs. C'est la raison pour laquelle, nous proposons la correspondance suivante entre nos intensités de sollicitation et ces classes d'environnement :

- intensité normale : classes 1, 2a, $2b_1$,
- intensité importante : classes $2b_2$, 3, $4a_1$, $4a_2$, 5a,
- intensité très importante : classes 4b, 5b, 5c.

Exemple des métaux :

La norme NF P 34-205-1 [AFN, 97] définit des ambiances intérieures et des atmosphères extérieures permettant de juger du risque de corrosion des métaux. Nous proposons la correspondance suivante entre les intensités de sollicitations et ces ambiances et atmosphères :

- intensité normale : ambiance saine, atmosphère rurale non polluée, atmosphère urbaine ou industrielle normale,
- intensité importante : ambiance agressive, atmosphère urbaine ou industrielle sévère,
- intensité très importante : atmosphères marines, atmosphère mixte, atmosphères particulières.

Exemple du bois :

L'eurocode 5 [AFN, 95] considère trois classes de service à prendre en compte lors du dimensionnement des structures en bois ; il s'agit :

- de la classe de service 1 : cette classe est caractérisée par une teneur en humidité dans les matériaux, qui correspond à une température de 20°C et une humidité relative ambiante ne dépassant 65% que quelques semaines par an,
- de la classe de service 2 : cette classe de service est caractérisée par une teneur en humidité dans les matériaux, qui correspond à une température de 20°C et une humidité relative ambiante ne dépassant 85% que quelques semaines par an,
- de la classe de service 3 : cette classe de service est caractérisée par des conditions climatiques conduisant à des taux d'humidité plus élevés qu'en classe de service 2.

Nous proposons de faire coïncider nos trois intensités de sollicitations normale, importante, très importante respectivement aux trois classes de service 1, 2 et 3.

Remarque : pour la catégorie environnementale des « actions mécaniques », nous considérons qu'elles sont classées en :

- « normale » s'il s'agit d'actions prises en compte lors du dimensionnement du produit intégré dans son système ({produit ; ouvrage ; environnement}),
- « importante » lorsqu'il s'agit d'actions non prises en compte lors du dimensionnement mais n'affectant pas la résistance mécanique du produit,
- « très importante » quand les actions n'ont pas été prises en compte lors du dimensionnement et qu'elles affectent la résistance mécanique du produit.

II.2. Base de données « fonctions »

II.2.1. Objectif de la base de données « fonctions »

La base de données des fonctions dites « génériques » regroupe l'ensemble des fonctions que sont susceptibles d'assurer les produits de construction et leurs composants. Son objectif est de faciliter la réalisation de l'analyse fonctionnelle (étape de l'analyse qualitative) d'un produit (*cf.* IV.1.2) et l'implémentation de la base de données « performances » (*cf.* II.5). Cette base de données est détaillée en annexe 9 de ce mémoire.

II.2.2. Structuration et contenu de la base de données « fonctions »

Cette base de données est structurée en trois champs, contenant des objets textes, intitulés :
a) type de fonction,
b) catégorie environnementale,
c) désignation de la fonction.

a) Type de fonction
Chaque type de fonction regroupe un ensemble de fonctions pour lesquelles les produits et les composants soumis à des flux d'agents environnementaux réagissent de la même manière ; il s'agit des sept types : stopper, absorber, transporter, transformer, résister mécaniquement, être intègre.

b) Catégorie environnementale
Ce champ précise la catégorie environnementale (*cf.* II.1) à laquelle se rapporte la fonction associée.

c) Désignation de la fonction
Ce champ inclut l'ensemble des fonctions proposées.

Un extrait de cette base de données permettant d'illustrer sa structuration est présenté à la figure 36.

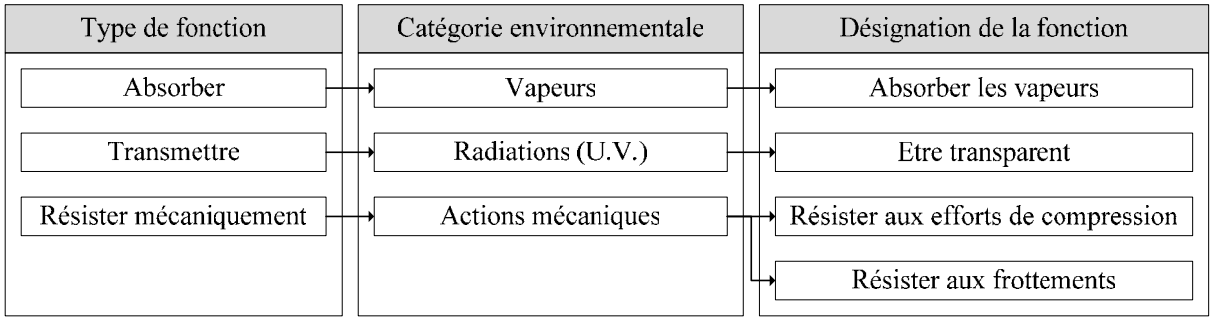


Figure 36 : Structuration de la base de données « fonctions »

II.2.3. Implémentation de la base de données « fonctions »

Pour pouvoir définir les fonctions assurées par l'ensemble des produits de construction et de leurs composants, nous avons déterminé leurs réactions possibles lorsqu'ils sont soumis aux flux d'agents environnementaux (*cf.* II.1). Ces flux d'agents environnementaux peuvent être classifiés en trois types de flux :
a) flux de passage,
b) flux de force,
c) flux de contact.

a) Flux de passage
Nous considérons qu'il existe cinq types de réaction possibles des produits ou des composants lorsqu'ils sont soumis aux flux de passage des agents environnementaux ; ils sont schématisés à la figure 37. Les blocs représentent des produits ou des composants et les flèches en noir ou gris correspondent aux flux d'agents environnementaux.

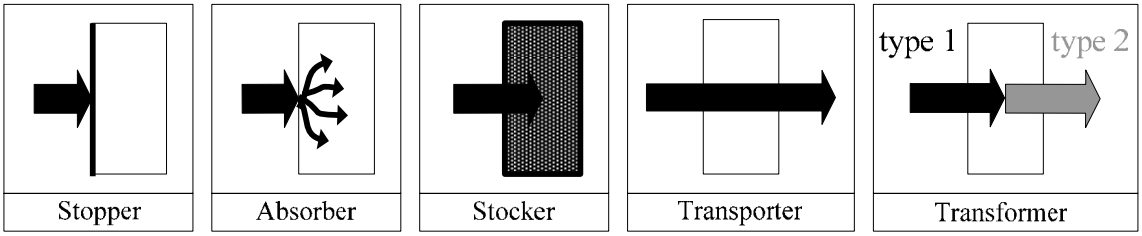


Figure 37 : Schématisation des cinq types de réaction possibles - flux de passage

b) Flux de force

Les fonctions qui permettent de résister aux flux de force, essentiellement les flux d'actions mécaniques, sont regroupés sous le type « résister mécaniquement ».

c) Flux de contact

Les flux de contacts des agents environnementaux sollicitent les propriétés mécano-physico-chimique des produits et composants ; elles correspondent à leurs aptitudes à ne pas se dégrader mécaniquement, physiquement et chimiquement dans le temps au contact de ces agents environnementaux. Ces fonctions sont regroupées sous le terme « être intègre ».

Aux sept types de fonctions citées précédemment (stopper, absorber, stocker, transporter, transformer, résister mécaniquement, être intègre) nous ajoutons les deux types : être conforme aux exigences de l'utilisateur et être conforme aux normes. Ces fonctions sont généralement incluses dans celles citées précédemment mais il peut être intéressant de les distinguer, notamment lors de l'étape d'analyse des performances (IV.4), si l'utilisateur souhaite connaître directement l'évolution des performances de ces deux types de fonctions.

La base de données « fonctions » regroupe actuellement quatre-vingt dix-sept fonctions génériques.

II.2.4. Utilisation de la base de données « fonctions »

Lors de l'analyse fonctionnelle d'un produit (*cf.* IV.1.2), l'utilisateur sélectionne dans cette base de données les fonctions assurées par le produit et ses composants. Cette base de données permet ainsi :

- d'accélérer la démarche d'analyse fonctionnelle d'un produit,
- de minimiser les risques d'oubli de fonctions puisqu'elle regroupe l'ensemble des fonctions assurées par les produits de construction,
- de conserver une terminologie semblable entre les différentes études menées suivant cette méthodologie et, par conséquent, de faciliter l'implémentation puis l'utilisation de la base de données « performances » (*cf.* II.5).

II.3. Base de données « phénomènes »

II.3.1. Objectif de la base de données « phénomènes »

Cette base de données englobe l'ensemble des informations phénoménologiques qualitatives et quantitatives utiles à notre méthodologie, afférant aux différents niveaux géométriques (matériau, composant, produit). Son objectif est, d'une part, de capitaliser les informations collectées lors de l'analyse qualitative (*cf.* IV.1) et de l'analyse quantitative temporelle (*cf.* IV.2) d'un produit, et d'autre part, de faciliter la réalisation de ces étapes.

II.3.2. Structuration et contenu de la base de données « phénomènes »

Cette base de données est décomposée en cinq champs :

a) description du phénomène,
b) description du produit étudié,
c) causes du phénomène,
d) conséquences du phénomène,
e) quantification temporelle.

a) Description du phénomène

La description du phénomène est réalisée de manière, d'une part, à ce qu'elle soit compréhensible par l'ensemble des experts en matériaux et produits de construction, et d'autre part, pour qu'il soit aisé de rechercher les informations relatives à un phénomène spécifique.

Dans ce contexte, ce champs inclut quatre sous-champs, contenant des objets textes :

1. **dénomination générale**, sous-champ incluant les principaux phénomènes de dégradation des matériaux et composants connus,
2. **dénomination exacte**, sous-champ associant à une dénomination générale la terminologie la plus communément utilisée par les experts,
3. **granularité**, sous-champ définissant le niveau géométrique auquel se rapporte le phénomène considéré (par exemple, le matériau pour un phénomène de dilatation et le composant dans le cas du flambement),
4. **définition du phénomène**, sous-champ décrivant son mécanisme et ses principales conséquences. Un format commun, sous forme de texte à trous, est proposé afin d'éviter une trop grande disparité entre les définitions des phénomènes.

b) Description du produit étudié

Ce champ comprend deux sous-champs contenant des objets textes :

1. **produit étudié**, sous-champ permettant d'identifier le produit auquel se rapportent les informations qualitatives et quantitatives du phénomène associé,
2. **matériau**, sous-champ renseignant l'entité géométrique à laquelle est associé ce phénomène ; une liste des matériaux de construction a été établie pour guider l'implémentation de ce champ, et faciliter la recherche de données en entrant par ce champ.

c) Causes du phénomène

Ce champ inclut cinq sous-champs contenant des objets textes :

1. **agents environnementaux**, sous-champ incluant les causes de dégradation générées par des agents environnementaux (ou leur combinaison) tels que définis dans la base de données « agents environnementaux »,
2. **incompatibilités entre matériaux**, sous-champ regroupant les causes de dégradation due à des incompatibilités mécanique, physique ou chimique entre matériaux,
3. **erreurs lors du processus**, sous-champ englobant les erreurs commises lors du processus de construction (conception et mise en œuvre) qui peuvent engendrer des phénomènes soit en phase de mise en œuvre, soit en phase d'exploitation,
4. **phénomènes précurseurs**, sous-champ renseignant les phénomènes antérieurs pouvant entraîner le phénomène considéré,
5. **référence,** sous-champ décrivant la source des données afférant à un phénomène afin de conforter la validité de ces informations.

Remarques : un phénomène peut être lié à différentes combinaisons de causes, c'est la raison pour laquelle, dans le souci de faciliter la lisibilité et l'exploitation de cette base de données, une ligne est associée à chaque combinaison de causes. Un phénomène peut donc posséder plusieurs lignes.
Nous distinguons également les causes qui entraînent directement un phénomène et celles qui influencent la cinétique de ce dernier. Ainsi, si seules les causes influençant la cinétique sont présentent, le phénomène ne se réalisera pas.

d) Conséquences du phénomène
Ce champ regroupe l'ensemble des informations (sous forme d'objets textes) nécessaires à la détermination des phénomènes susceptibles de succéder au phénomène considéré, afin de faciliter la détermination des scénarii d'un produit.

e) Quantification temporelle
Ce champ inclut les données nécessaires à l'analyse quantitative temporelle (*cf.* IV.2) d'un produit ; il se décompose en quatre sous-champs :

1. **donnée d'état de dégradation brute** (contient des objets textes, numériques et graphiques), il regroupe les données temporelles telles qu'elles sont collectées,
2. **référence de la donnée brute** (contient des objets textes), il décrit la source de cette donnée utile à l'évaluation de sa qualité (*cf.* méthode de traitement des données élaborées, I.2),
3. **paramètres de transformation** (contient des objets textes et numériques), il englobe les valeurs des paramètres obtenus par la méthode de transformation d'une donnée brute (*cf.* I.1),
4. **donnée d'état de dégradation élaborée** (contient des objets textes, numériques et graphiques), il inclut le résultat de la méthode de transformation d'une donnée brute en une donnée élaborée (*cf.* I.1).

Remarque : le développement de cette base de données a fait l'objet d'un travail de fin d'étude d'ingénieur. Pour plus d'informations le lecteur intéressé pourra donc se reporter au mémoire rédigé à l'issue de ce projet de recherche et développement [FAB, 05].

II.3.3. Implémentation de la base de données « phénomènes »

La base de données « phénomènes » est implémentée au fur et à mesure des études de produits de construction selon la méthodologie proposée lors de l'étape d'analyse qualitative pour les informations qualitatives et lors de l'étape d'analyse quantitative temporelle pour les informations quantitatives.
Elle contient les données afférant aux quatre applications développées en troisième partie de ce mémoire ; c'est-à-dire les données associées à environ cent vingt phénomènes génériques.

II.3.4. Utilisation de la base de données « phénomènes »

Cette base de données est utilisée en :

a) capitalisation des résultats des analyses qualitative et quantitative d'un produit.
b) aide à la réalisation de ces étapes.

a) Capitalisation des résultats des analyses qualitative et quantitative
Les phénomènes décrits lors de la réalisation de l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets (*cf.* IV.1.2) permettent de compléter les quatre premiers champs de cette base de données. Les résultats de l'étape de quantification temporelle des phénomènes (*cf.* IV.2) sont capitalisés dans le dernier champ.

b) Aide à la réalisation des analyses qualitative et quantitative

En ce qui concerne l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets, la démarche de recherche d'informations dans cette base de données est présentée à la figure 38.

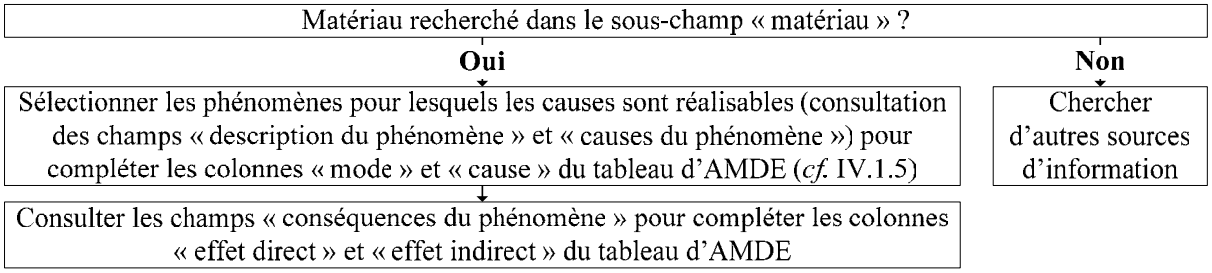


Figure 38 : Navigation dans la base de données « phénomènes » pour la réalisation d'une analyse qualitative

La démarche de recherche d'informations quantitatives dans cette base de données consiste à retenir les données des sous-champs « donnée d'état de dégradation élaborée » et « référence de la donnée brute » pour lesquels le triplet {phénomène, matériau, causes} est identique à celui recherché (consultation des champs « description du phénomène » et « causes du phénomène »).

II.4. Base de données « probabilités d'apparition »

II.4.1. Objectif de la base de données « probabilités d'apparition »

La base de données « probabilités d'apparition » regroupe les probabilités d'apparition d'une part collectées, et d'autre part estimées, relatives aux différents niveaux de l'échelle géométrique. Son objectif est de permettre la capitalisation des informations recueillies ou générées lors de l'analyse quantitative temporelle (*cf.* IV.2) et l'aide à la réalisation de cette étape de la méthodologie.

II.4.2. Structuration et contenu de la base de données « probabilités d'apparition »

Cette base de données contient les quatre champs suivants :

a) description géométrique,
b) description phénoménologique,
c) informations collectées,
d) informations déduites.

a) Description géométrique

Ce champ permet de décrire en trois sous-champs (contenant des objets textes) « produit étudié », « échelle géométrique » et « entité géométrique » les caractéristiques géométriques de la donnée renseignée.

b) Description phénoménologique

Ce champ permet de renseigner en deux sous-champs (contenant des objets textes), « échelle phénoménologique » et « entité phénoménologique », les caractéristiques phénoménologiques de la donnée considérée.

c) Informations collectées

Nous avons proposé deux approches permettant d'obtenir la probabilité d'apparition d'un phénomène (*cf.* I.3.2-c), la première par unification de données brutes et la seconde par estimation. Ce champ « informations collectées » est implémenté lorsque des données brutes sont disponibles.

Il regroupe l'ensemble des informations utiles à la transformation d'une donnée brute de probabilité d'apparition en une donnée élaborée (*cf.* I.1) ; il est décomposé en quatre sous-champs : « donnée brute de probabilité d'apparition », « référence de la donnée », « paramètres de transformation » et « donnée élaborée de probabilité d'apparition ».

La structure de ces sous-champs est semblable à celle décrite pour la base de données « phénomènes » puisque la démarche d'obtention des informations capitalisées est identique (*cf.* I.1).

d) Informations déduites

Le champ « informations déduites » vise à regrouper l'ensemble des informations utiles à l'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène ; il est décomposé en quatre sous-champs, contenant des objets textes et numériques :

- **indicateur d'environnement**, ce sous-champ regroupe les valeurs obtenues pour l'indicateur d'environnement lié à l'intensité des sollicitations et à la nature du contact ainsi que les hypothèses formulées pour obtenir ce résultat,
- **indicateur de conception**, il inclut les valeurs d'indicateur de conception lié à la qualité de conception du produit et les hypothèses formulées,
- **indicateur de démarrage**, ce sous-champ renseigne les valeurs d'indicateur de démarrage obtenues et les hypothèses formulées pour obtenir ce résultat,
- **indicateur de cinétique relative**, il inclut les valeurs d'indicateur de cinétique relative lié à la cinétique de dégradation des phénomènes considérés et les hypothèses formulées pour obtenir ces résultats,
- **probabilité d'apparition**, ce sous-champ regroupe les résultats des estimations.

II.4.3. Implémentation de la base de données « probabilités d'apparition »

L'implémentation de cette base de données est réalisée au fur et à mesure que des études de produit de construction sont menées (étape d'analyse quantitative temporelle de la méthodologie, *cf.* IV.2). Cette base de données est actuellement vide.

II.4.4. Utilisation de la base de données « probabilités d'apparition »

La base de données « probabilités d'apparition » a une double utilité :

a) capitalisation des informations de probabilité d'apparition,
b) aide à la réalisation de l'analyse quantitative des performances

a) Capitalisation des informations de probabilité d'apparition

La capitalisation consiste à conserver les informations utilisées pour l'évaluation ou l'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène afin qu'elles puissent être utilisées en aide à l'application de la méthodologie à un autre produit.

b) Aide à la réalisation de l'analyse quantitative des performances

La démarche de recherche d'informations dans cette base de données est présentée à la figure 39.

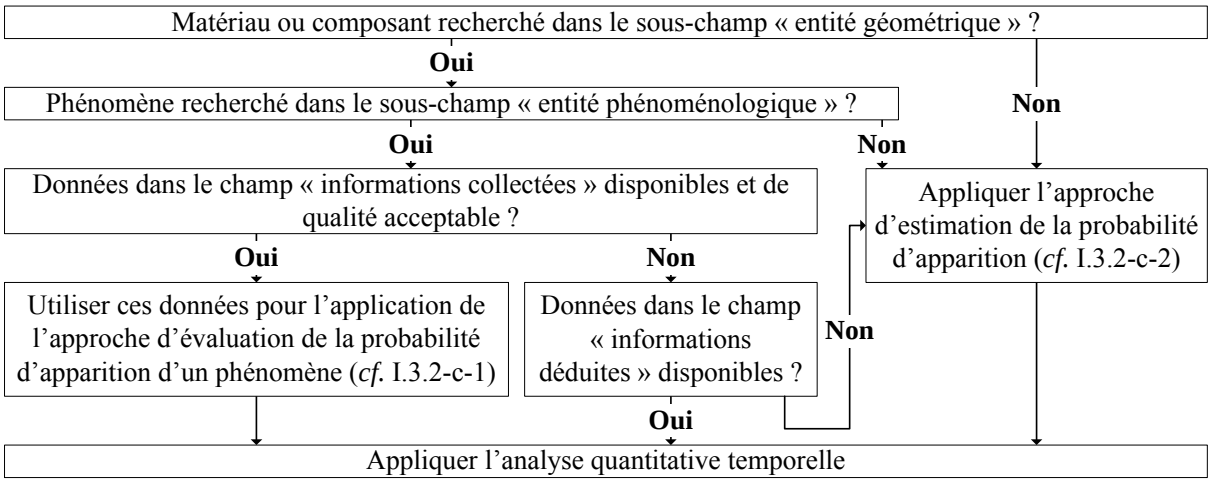


Figure 39 : Navigation dans la base de données « probabilités d'apparition » pour la réalisation d'une analyse quantitative des performances

II.5. Base de données « performances »

II.5.1. Objectif de la base de données « performances »

La base de données « performances » englobe les informations quantitatives de performances fonctionnelles relatives aux composants et produits de construction. Son objectif est de capitaliser les informations collectées et générées lors de l'analyse quantitative des performances (*cf.* IV.4) et d'aider à la réalisation de cette étape de la méthodologie.

II.5.2. Structuration et contenu de la base de données « performances »

Cette base de données regroupe cinq champs :

a) description fonctionnelle,
b) description géométrique,
c) description phénoménologique,
d) informations liées aux caractéristiques intrinsèques,
e) informations liées aux performances fonctionnelles,
f) référence.

a) Description fonctionnelle

Ce champ permet de décrire en deux sous-champs (contenant des objets textes) « échelle fonctionnelle » et « entité fonctionnelle » les caractéristiques fonctionnelles de la donnée renseignée.

b) Description géométrique

Il est identique à celui de la base de données « probabilités d'apparition » (*cf.* II.4.2-a).

c) Description phénoménologique

Ce champ est semblable à celui de la base de données « probabilités d'apparition » ayant la même dénomination (*cf.* II.4.2-b).

d) Informations liées aux caractéristiques intrinsèques

Ce champ est décomposé en quatre sous-champs :

1. **caractéristique intrinsèque** (contenant des objets textes), ce champ regroupe les noms des caractéristiques intrinsèques permettant de mesurer l'évolution des niveaux de performance d'une fonction,
2. **donnée brute de caractéristique intrinsèque** (contenant des objets textes, numériques et graphiques), ce champ regroupe les informations quantitatives collectées afférant à chaque caractéristique intrinsèque,
3. **paramètres de transformation** (contenant des objets textes et numériques), il regroupe les paramètres obtenus lors de l'application de la méthode de transformation des données brutes,
4. **donnée élaborée de caractéristique intrinsèque** (contenant des objets textes, numériques et graphiques), ce champ inclut les résultats de la méthode de transformation des données brutes.

e) Informations liées aux performances fonctionnelles

Ce champ inclus quatre sous-champs :

1. **fonction caractéristique intrinsèque / performance fonctionnelle** (contenant des objets textes, numériques et graphiques), ce sous-champ englobe les fonctions reliant les valeurs de caractéristique intrinsèque aux niveaux de performance fonctionnelle (*cf.* I.5.2-a),
2. **donnée élaborée de performance fonctionnelle** (contenant des objets textes, numériques et graphiques), ce sous-champ regroupe les fonctions de niveau de performance (*cf.* I.5.2-a),
3. **combinaison entre fonctions** (contenant des objets textes et numériques), ce sous-champ comprend les équations de combinaisons de fonctions (équation [35] page 103) intégrant la fonction considérée,
4. **seuil de performance** (contenant des objets textes et numériques), ce sous-champ inclut les valeurs des seuils de défaillance associés, d'une part, à la fonction considérée, et d'autre part, aux combinaisons de fonctions intégrant cette fonction, et éventuellement, l'indication des référentiels ayant permis de fixer ces valeurs.

f) Référence

Ce champ permet de renseigner l'origine de la donnée capitalisée afin de pouvoir évaluer sa qualité lors de l'application de la méthode de traitement des données élaborées (*cf.* I.2).

II.5.3. Implémentation de la base de données « performances »

Cette base de données est implémentée au fur et à mesure de la réalisation d'études de produits de construction (étape d'analyse quantitative des performances, *cf.* IV.4). Elle est actuellement vide.

II.5.4. Utilisation de la base de données « performances »

Cette base de données est utilisée, d'une part, pour la capitalisation des informations collectées et générées lors de l'application de l'analyse quantitative des performances, et d'autre part, pour l'aide à la réalisation de cette étape.

En ce qui concerne cette seconde utilisation, la démarche de navigation dans cette base de données consiste à rechercher les données disponibles, correspondant au triplet {entité géométrique, entité phénoménologique, entité fonctionnelle} recherché.

II.6. Synthèse des bases de données

Les cinq bases de données proposées dans ce chapitre sont associées aux quatre étapes (qualitative et quantitatives) de la méthodologie :

- la base de données **« agents environnementaux »** englobe l'ensemble des agents environnementaux susceptibles de dégrader les produits de construction au cours de leur cycle de vie,
- la base de données **« fonctions »** regroupe l'ensemble des fonctions assurées par les produits de construction et leurs composants,
- la base de données **« phénomènes »** inclut les informations qualitatives et quantitatives des phénomènes de dégradation des matériaux et composants de construction,
- la base de données **« probabilités d'apparition »** renseigne les informations quantitatives de probabilité d'apparition des phénomènes,
- la base de données **« performances »** englobe les informations quantitatives de performances fonctionnelles des entités géométriques.

Les bases de données « agents environnementaux » et « fonctions » sont complètes, la base de données « phénomènes » regroupe les informations qualitatives et quantitatives relatives aux quatre applications détaillées en troisième partie de ce mémoire et sont implémentées au cours des études menées, alors que les bases de données « probabilités d'apparition » et « performances » sont vides puisque nous n'avons pas collecter d'informations relatives à ces deux bases de données lors des applications.

Le rôle des bases de données « agents environnementaux » et « fonctions » est d'aider à la réalisation de la méthodologie et l'objectif des trois autres bases de données est de capitaliser les informations collectées et générées lors de l'application de la méthodologie afin (à termes) d'aider à la réalisation d'autres études.

Chapitre III : Propositions d'outils de représentation

Introduction aux outils de représentation

Les outils de représentation permettent des synthèses graphiques des principaux résultats de la méthodologie. Nous proposons trois outils de représentation :

- graphe événementiel des défaillances,
- arbre des défaillances,
- représentations radar.

Pour chacun des outils de représentation, nous présentons dans les paragraphes suivants :

- son objectif,
- sa structuration,
- une illustration.

Remarque : nous ne détaillons pas dans ce chapitre les graphes structurels, topologiques, des contacts et fonctionnels ; ces graphes permettent de faciliter la réalisation de l'analyse qualitative d'un produit de construction. Nous présentons ceux liés aux applications de la méthodologie dans la troisième partie de ce mémoire.

III.1. Graphe événementiel des défaillances

III.1.1. Objectif du graphe événementiel des défaillances

Le graphe événementiel des défaillances permet d'avoir une vision synthétique des principaux résultats de l'analyse qualitative utiles à l'utilisateur, c'est-à-dire l'évolution chronologique des enchaînements des phénomènes d'un produit.

Remarque : ce graphe est tracé à la fin de l'analyse quantitative de la criticité afin de ne représenter qu'un nombre réduit de scénarii (ceux à criticité majeure) et donc d'être lisible.

III.1.2. Structuration du graphe événementiel des défaillances

La structuration détaillée dans ce paragraphe est illustrée à la figure 41.
Le graphe événementiel des défaillances se décompose en quatre zones :

- **état initial**, cette zone permet de décrire l'ensemble des paires {composant ; fonction} telles que définies lors de la conception, l'intérêt étant de pourvoir visualiser l'évolution de l'affectation des fonctions par les phénomènes au cours du temps,
- **phénomènes survenus lors du processus de construction**,
- **phénomènes réalisés lors de la phase d'exploitation du produit**,
- **défaillance**, cette zone regroupe les phénomènes pour lesquels les fonctions associées ont atteint leur seuil de défaillance (*cf.* I.5).

Remarques : nous distinguons les phénomènes liés au processus de construction de ceux associés à la phase d'exploitation dans la mesure où ils peuvent être plus ou moins pertinents selon les utilisateurs. Nous considérons que les entrepreneurs peuvent être davantage intéressés par les premiers alors que les gestionnaires de patrimoine par les seconds.

La zone de défaillance pour un même produit peut être variable en fonction des seuils de défaillance fixés par l'utilisateur.

Le graphe événementiel des défaillances permet de visualiser pour chaque phénomène :

- sa **dénomination exacte**, telle que définie dans la base de données « phénomènes »,
- son **entité géométrique**, souvent le composant,
- les **fonctions**, telles que définies dans la base de données « fonctions », qu'il affecte,
- les **phénomènes antérieurs et postérieurs**, nous distinguons les phénomènes directs, ceux dont la cause entraîne le phénomène suivant, des phénomènes indirects, ceux dont la cause influence la cinétique du phénomène suivant,
- ses **causes**.

La symbolique proposée de représentation d'un phénomène dans le graphe événementiel des défaillances est présentée à la figure 40 :

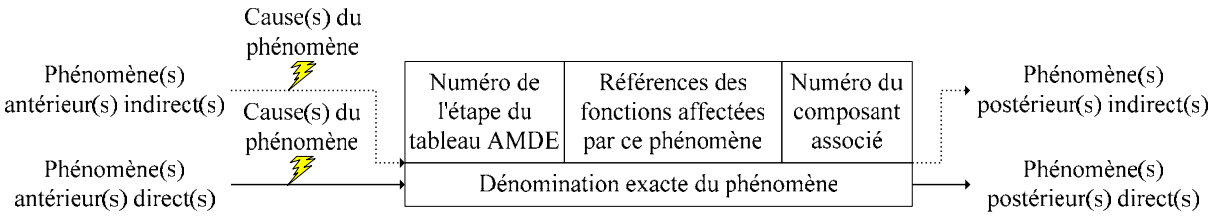


Figure 40 : Représentation d'un phénomène dans le graphe événementiel des défaillances

III.1.3. Illustration du graphe événementiel des défaillances

La figure 41 est un extrait simplifié (tous les composants et toutes les fonctions ne sont pas représentées) d'un graphe événementiel des défaillances d'une fenêtre (décrite à la figure 46, page 125). Les composants y sont référencés par des numéros (1 : vitrage, 2 : joint d'adhérence, 3 : écarteur, 4 : joint d'étanchéité, 5 : lame d'air), le produit est désigné par la lettre « P » et les fonctions sont numérotées (F_1 : être transparent, F_2 : être étanche, F_3 : maintenir en position, F_4 : être intègre, F_5 : résister mécaniquement).

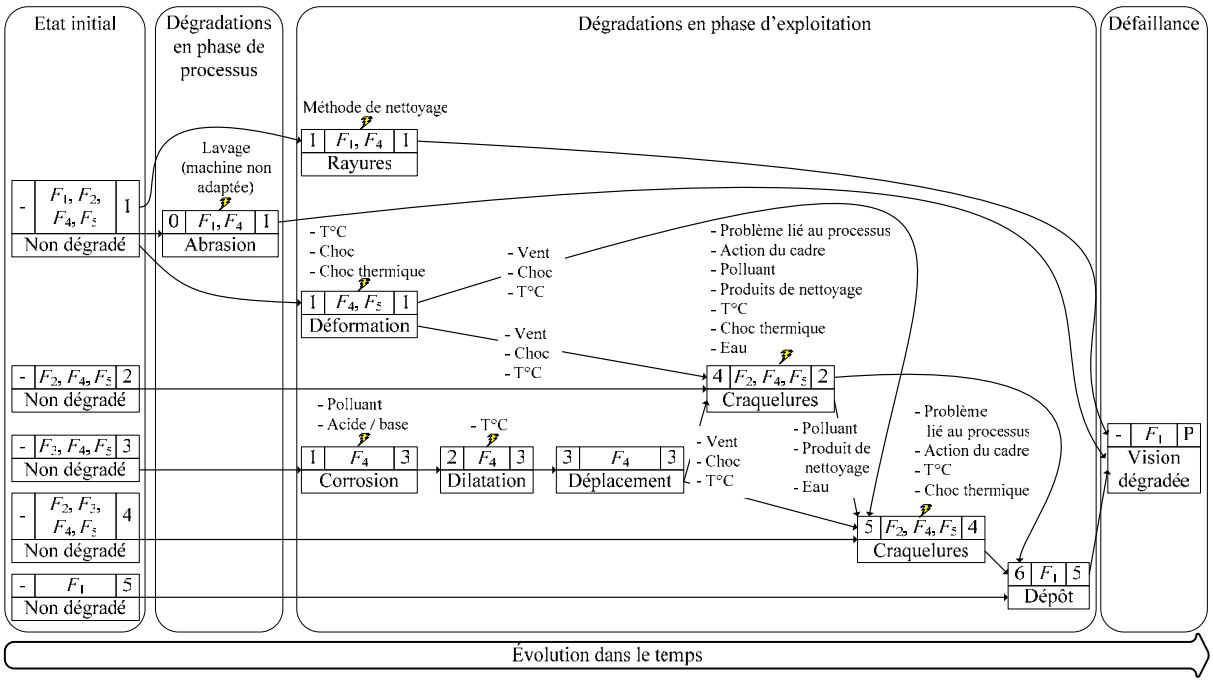


Figure 41 : Extrait du graphe événementiel des défaillances d'une fenêtre

III.2. Arbre des défaillances

III.2.1. Objectif de l'arbre des défaillances

L'arbre des défaillances permet de représenter la nature des interactions qui existent entre les phénomènes identifiés lors de l'analyse qualitative (*cf.* IV.1). L'arbre des défaillances et le graphe événementiel des défaillances sont deux outils de représentation complémentaires. La construction de l'arbre des défaillances est une démarche déductive, c'est-à-dire qu'elle part du phénomène final d'un scénario ou de plusieurs scénarii pour remonter aux phénomènes précurseurs.

Remarque : cet arbre est tracé à l'issue de l'analyse quantitative de la criticité afin de ne représenter que les phénomènes des scénarii classés à « criticité majeure » et d'être ainsi un graphique lisible.

III.2.2. Structuration de l'arbre des défaillances

Les phénomènes et leurs interactions sont représentés sur l'arbre des défaillances, selon le formalisme usuel [PAG, 80], présenté à la figure 42. Il s'agit en effet d'un mode de représentation fréquemment utilisé dans le domaine industriel.

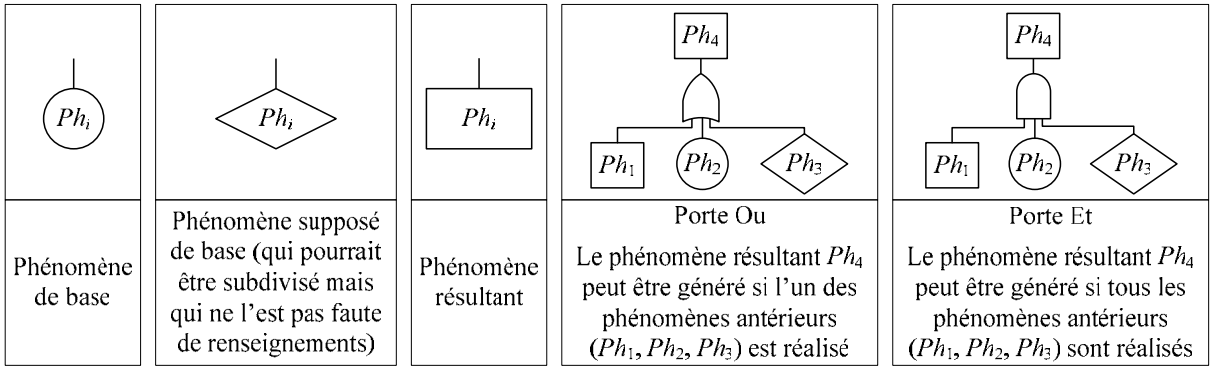


Figure 42 : Représentation des phénomènes et des portes logiques de l'arbre des défaillances

III.2.3. Illustration de l'arbre des défaillances

La figure 43 est un extrait d'un arbre des défaillances d'une fenêtre ; les phénomènes représentés correspondent à ceux décrits à la figure 41. Les numéros associés à chaque phénomène correspondent respectivement au numéro de l'étape du tableau d'AMDE et à la référence du composant / produit associés à ce phénomène.

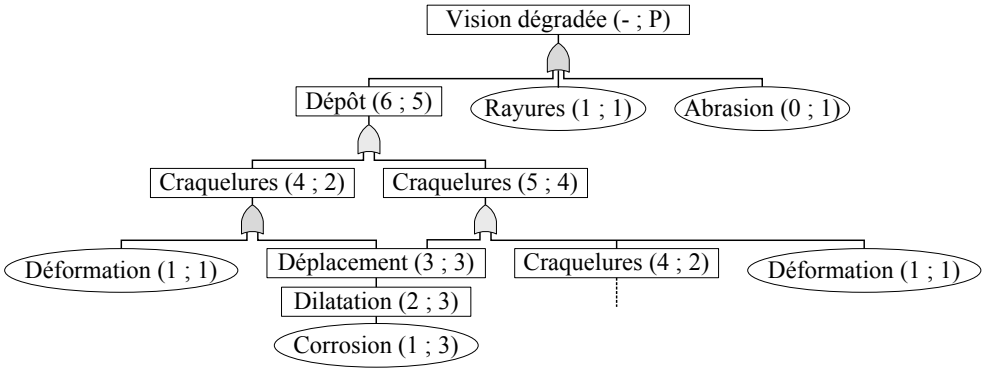


Figure 43 : Extrait d'un arbre des défaillances d'une fenêtre

III.3. Représentations radar

III.3.1. Objectif des représentations radar

Une représentation radar permet de visualiser simultanément les niveaux associés à un ensemble d'entités (par exemple, une performance fonctionnelle). L'objectif de la construction des représentations radar est, d'une part, de pouvoir comparer visuellement les niveaux atteints par ces entités, et d'autre part, de comparer des représentations radar obtenues à différents instants.

Remarque : de telles comparaisons ne sont possibles que si les mêmes échelles sont conservées au cours du temps.

Nous proposons deux utilisations :

a) représentation de certains résultats de l'analyse qualitative,
b) représentation des résultats de l'analyse quantitative des performances.

a) Représentation de certains résultats de l'analyse qualitative

Dans le cadre de l'analyse qualitative, les représentations radar permettent de représenter les intensités de sollicitations (normale, importante, très importante) de l'ensemble des agents environnementaux.

Nous utilisons ces représentations radar pour :

- expliciter l'apparition des phénomènes ou les variations des performances par étude des variations des intensités de sollicitations au cours du temps (pour un même produit et un même milieu),
- visualiser les différences entre plusieurs milieux d'un même produit ; par exemple, pour un mur (produit « barrière » entre un milieu extérieur et un milieu intérieur), nous visualisons le passage d'un agent environnemental d'un milieu à l'autre,
- comparer l'impact de l'environnement sur des produits différents (mêmes fonctionnalités et mêmes conditions climatiques),
- comparer l'impact de la variation des conditions climatiques (même produit, nature et concentration des agents environnementaux différentes).

b) Représentation des résultats de l'analyse quantitative des performances

Dans le cadre de l'analyse quantitative des performances, les représentations radar permettent de visualiser l'évolution au cours du temps des niveaux des performances fonctionnelles d'un produit ou d'un composant.

Remarque : l'utilisation de ces représentations radar est détaillée dans la troisième partie de ce mémoire.

III.3.2. Structuration des représentations radar

a) Représentation radar associée à l'analyse qualitative

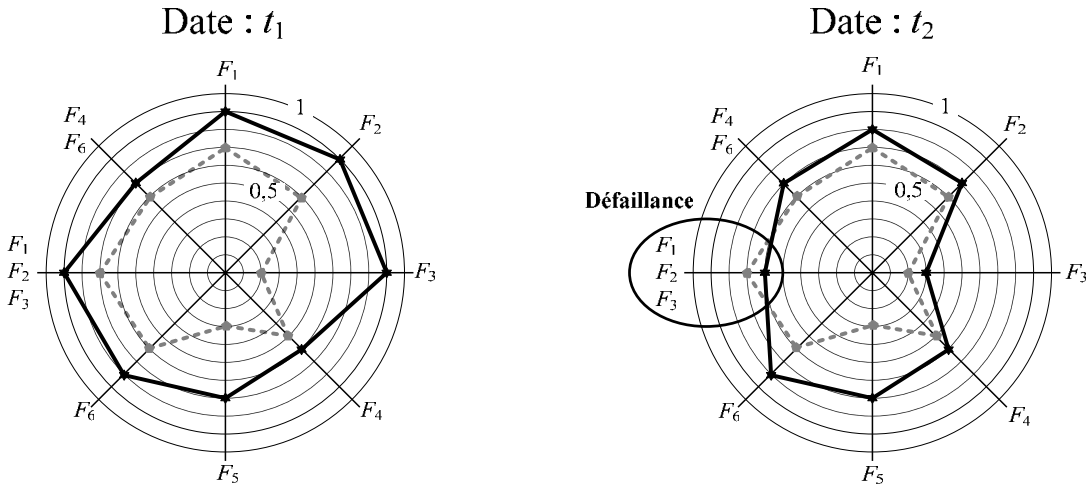
Cette représentation radar contient autant de branches que d'agents environnementaux présents dans le milieu étudié. L'échelle associée à chaque branche comprend trois niveaux correspondant aux trois intensités de sollicitations (*cf.* II.1.4-b).

b) Représentation radar associée à l'analyse quantitative des performances

Cette représentation radar inclut autant de branches que de fonctions et de combinaisons de fonctions liées suivant le cas à un produit ou à un composant. Nous proposons d'associer une échelle [0 ; 1] à chaque branche afin de coïncider avec l'échelle d'évaluation des niveaux de performances fonctionnelles (*cf.* I.5.2-a).

III.3.3. Illustration des représentations radar

La figure 44 présente deux représentations radar des performances, l'une à une date t_1 et l'autre à une date t_2, d'un produit ayant six fonctions $\{F_k\}$ dont certaines sont liées (F_1, F_2 et F_3 d'une part et F_4 et F_6 d'autre part). Les lignes continues noires relient les niveaux de performances associées (aux dates considérées) à chaque fonction et chaque combinaison de fonctions ; les lignes pointillées grises relient les seuils de défaillance de ces fonctions et combinaisons de fonctions. A la date t_2, le produit est défaillant puisque le niveau de performance de la combinaison de fonction F_1-F_2-F_3 est inférieur à son seuil de défaillance.



Fonction	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_1-F_2-F_3	F_4-F_6
Niveau	0,9	0,9	0,9	0,6	0,7	0,8	0,9	0,7
Seuil	0,7	0,6	0,2	0,5	0,3	0,6	0,7	0,6

Fonction	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_1-F_2-F_3	F_4-F_6
Niveau	0,8	0,7	0,3	0,6	0,7	0,8	0,6	0,7
Seuil	0,7	0,6	0,2	0,5	0,3	0,6	0,7	0,6

Figure 44 : Représentations radar associées à l'analyse quantitative des performances

III.4. Synthèse des outils de représentation

Les trois outils de représentation proposés dans ce chapitre permettent de représenter graphiquement les résultats des analyses qualitative et quantitatives de la méthodologie :

- graphe événementiel des défaillances : représentation de l'évolution au cours du temps des enchaînements de phénomènes (analyse qualitative),
- arbre des défaillances : représentation des interactions entre phénomènes (analyse qualitative),
- représentations radar : représentations des intensités de sollicitations des agents environnementaux (analyse qualitative) et des niveaux de performances fonctionnelles (analyse quantitative des performances).

Chapitre IV : Proposition d'une méthodologie

Introduction à la méthodologie

Dans les trois chapitres précédents, nous avons détaillé trois types de propositions, des méthodes, des bases de données et des outils de représentation, utiles à l'application de la méthodologie que nous développons dans ce chapitre.

Comme exposé dans l'introduction générale de cette partie, la méthodologie proposée d'évaluation du profil multi-performance des fonctions d'un produit de construction au cours du temps se décompose en cinq étapes :

- analyse qualitative (*cf.* IV.1),
- analyse quantitative temporelle (*cf.* IV.2),
- analyse quantitative de la criticité (*cf.* IV.3),
- analyse quantitative des performances (*cf.* IV.4),
- présentation des résultats (*cf.* IV.5).

Pour chacune de ces étapes nous présentons dans les paragraphes suivants, son objectif et sa démarche, utilisant les méthodes, les bases de données et les outils de représentation développés précédemment.

Remarque : pour les méthodes et certains outils de représentation de l'analyse qualitative, nous ne les avons pas détaillés dans les chapitres précédents et nous ne présenterons dans ce chapitre que les apports aux méthodes existantes ; pour plus d'information le lecteur intéressé pourra se reporter à : [LAI, 00], [TAL, 02], [CHE, 03], [TAL, 03], [TAL, 04] et [TAL, 05].

IV.1. Analyse qualitative

IV.1.1. Objectif de l'analyse qualitative

L'analyse qualitative consiste à modéliser le comportement d'un produit de construction au cours du temps. Cette analyse se décompose en deux phases, d'une part la modélisation fonctionnelle du produit, d'autre part la détermination de l'ensemble des phénomènes affectant les composants du produit et leurs enchaînements. Nous cherchons à identifier les phénomènes qui se réalisent en phase d'exploitation mais qui peuvent aussi être liés aux phases de conception et de mise en œuvre.

IV.1.2. Démarche de l'analyse qualitative

L'analyse qualitative d'un produit comprend quatre phases :

- **analyse structurelle** : modélisation de la structure du produit et de son environnement par détermination des limites et des échelles de l'étude, décomposition structurelle, caractérisation des interfaces puis des milieux,
- **analyse fonctionnelle** : modélisation du comportement fonctionnel du produit au cours du temps par identification des fonctions assurées par ce produit et ses composants puis classification de ces fonctions,
- **analyse du processus** : identification de l'ensemble des phénomènes dus au processus de construction qui sont susceptibles d'influencer le comportement du produit en phase d'exploitation,
- **analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE)** : détermination et caractérisation (fonction, composant ou interface, causes et conséquences) de l'ensemble des phénomènes susceptibles d'influencer le comportement du produit en phase d'exploitation et leurs enchaînements.

Les liens existant entre les méthodes qualitatives, les bases de données et cette étape de la méthodologie sont représentés à la figure 45 (items écrits en noir avec des fonds grisés).

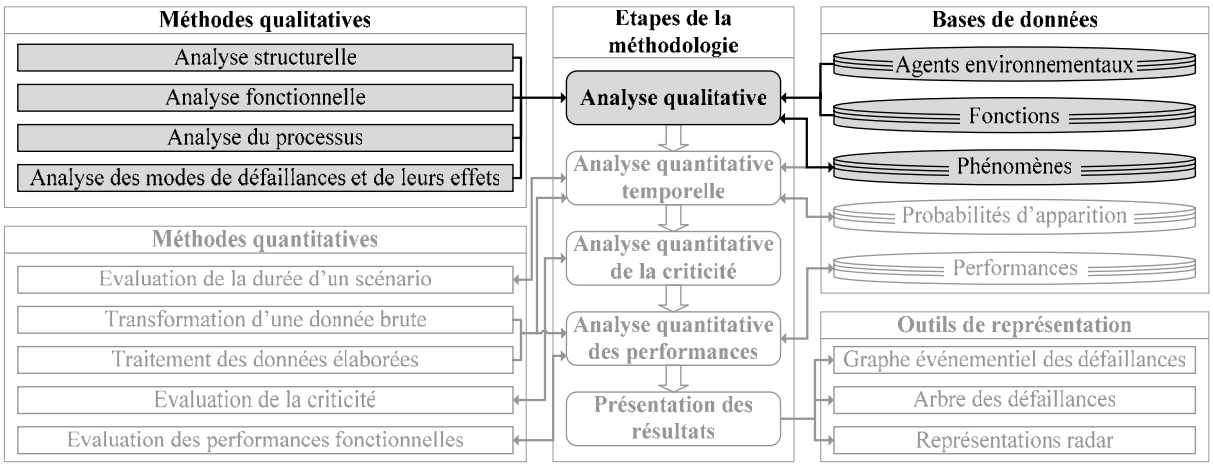


Figure 45 : Liens entre les propositions précédentes et l'étape d'analyse qualitative

Les apports proposés aux méthodes qualitatives existantes concernent :

a) l'**analyse structurelle** : introduction des notions d'interface, de composant externe, de contact direct et indirect, amélioration de la base de données « agents environnementaux », création d'outils de représentation (graphes et représentation radar),

b) l'**analyse fonctionnelle** : modification de la terminologie, introduction de règles expertes, création de la base de données « fonctions » et du graphe fonctionnel,

c) l'**analyse des modes de défaillances et de leurs effets** : introduction des résultats de l'analyse du processus dans l'AMDE, création de la base de données « phénomènes », formalisation de la démarche itérative de l'AMDE.

a) Apports à l'analyse structurelle

Introduction de la notion d'interface

Une interface est la zone de liaison entre deux composants du système étudié (produit et environnement) ; elle est définie par sa géométrie (volumique, surfacique ou linéaire) et par son mode de liaison (mécanique : encastrement, collage, adhérence, soudage, vissage, rivetage, contact simple ; ou physique : appui simple, rotule, glissant, …).

Cette notion permet de formaliser les liaisons existant entre composants, afin d'aider à la détermination des enchaînements de phénomènes ; par exemple, la transmission d'un effort d'un composant 1 à un composant 2 (identifiée par la liaison entre ces deux composants) peut entraîner une dégradation du deuxième composant).

Introduction de la notion de composant externe

Un composant externe est un composant de jonction entre le produit étudié et l'ouvrage dans lequel il est incorporé, il est externe aux limites spatiales du produit ; il s'agira par exemple du mastic d'étanchéité entre une fenêtre et une maçonnerie.

L'intérêt de l'introduction de cette notion réside dans la possibilité, grâce à ces composants, de passer de l'analyse qualitative d'un produit à l'analyse qualitative d'un ouvrage ; ce qui est détaillé en partie C de ce mémoire par l'application de l'analyse qualitative à un complexe mur en béton et fenêtre fixe (*cf.* I.1.4 de la partie C).

Introduction des notions de contact direct et indirect

Nous introduisons la notion de contact pour formaliser les « liaisons » existant entre les composants et les milieux d'un produit, nous proposons deux types de contact : contact direct et contact indirect.

Un composant est en contact direct avec un milieu lorsque les agents du milieu peuvent impacter directement sur ce composant ; il peut s'agir de la pluie sur le verre extérieur (cas d'une fenêtre). A l'inverse, un composant est en contact indirect avec un milieu lorsqu'il existe d'autres composants agissant comme des « barrières » ou des « filtres » entre ce composant et ce milieu ; par exemple, le verre intérieur est en contact indirect avec la température extérieure (cas d'une fenêtre avec double vitrage).

Cette notion est utile à l'obtention de la probabilité d'apparition d'un phénomène (*cf.* I.3.2-c).

Amélioration de la base de données « agents environnementaux »

La base de données « agents environnementaux » proposée (*cf.* II.1) est fondée sur une liste d'agents environnementaux établie par A. Lopez [LOP, 01]. Les améliorations que nous avons apportées à cette liste sont les suivantes :

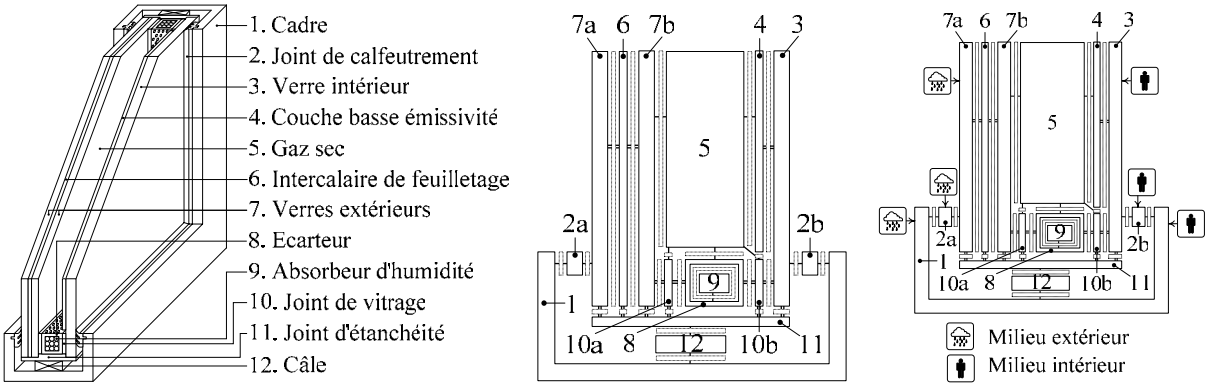
- implémentation de cette liste et structuration en « catégorie environnementale » et « composante environnementale »,
- ajout des champs « unités de mesure » et « référentiels » pour l'évaluation de l'intensité de sollicitation de chaque agent environnemental lors de l'obtention de la probabilité d'apparition d'un phénomène (*cf.* I.3.2-c).

Création d'outils de représentation

Nous proposons quatre outils de représentation permettant de présenter graphiquement les résultats de l'analyse structurelle :

- **graphe structurel** : schématisation de la décomposition structurelle d'un système,
- **graphe topologique** : représentation de la modélisation structurelle d'un système permettant de vérifier la cohérence de cette modélisation au regard du système réel,
- **graphe des contacts** : schématisation des contacts entre les milieux, les composants et les interfaces d'un système,
- **représentation radar « agents environnementaux »** : représentation de l'intensité de sollicitations de l'ensemble des agents environnementaux d'un milieu (*cf.* III.3).

Les trois graphes obtenus pour l'exemple d'une fenêtre sont présentés à la figure 46 :



Graphe structurel *Graphe topologique* *Graphe des contacts*

Figure 46 : Graphes associés à l'exemple d'une fenêtre

b) Apports à l'analyse fonctionnelle

Modification de la terminologie

Nous proposons deux classes de fonctions : principales et secondaires.
Une fonction principale est une représentation en termes fonctionnels du service attendu par l'utilisateur, ce pour quoi le produit a été créé. Elle peut résulter de la limitation de liberté de conception en raison de contraintes externes telles que la protection de l'environnement, les normes de sécurité, les choix constructifs incontournables. Les fonctions secondaires sont mises en œuvre pour satisfaire et réaliser les fonctions principales.
Les fonctions principales intéressent directement les utilisateurs, c'est pourquoi nous considérons que seule la défaillance d'une fonction principale ou d'une combinaison de fonctions principales peut entraîner la défaillance d'un produit.

Introduction de règles expertes

Nous introduisons des règles expertes entre les agents environnementaux et les fonctions possibles d'un produit en vue d'automatiser la génération du graphe fonctionnel (et par la suite l'AMDE). Une règle experte permet de déduire l'état d'un agent environnemental à la « sortie » d'un composant lorsque l'on connaît son état en « entrée » et la ou les fonctions que ce composant remplit.

Création de la base de données « fonctions »

La structuration de la base de données « fonctions » et son utilisation sont détaillées au paragraphe II.2.

Création du graphe fonctionnel

Le graphe fonctionnel schématise les fonctions assurées par chaque composant et le comportement global du produit soumis aux flux d'agents environnementaux. Il permet ainsi de visualiser l'ensemble des triplets {composant ; fonction ; agent environnemental} à considérer pour la détermination des phénomènes lors de l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets d'un produit. Des exemples de graphe fonctionnel de la fenêtre sont présentés à la figure 59 de la partie C (page 144) et en annexe 10.

c) Apports à l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets

Introduction des résultats de l'analyse du processus dans l'AMDE

Nous introduisons les résultats de l'analyse du processus de construction d'un produit dans le tableau d'AMDE de la même manière que les phénomènes survenus lors de la phase d'exploitation ; cependant nous notons « 0 » dans l'étape d'itération de l'AMDE (*cf.* tableau 39) pour les phénomènes dus au processus qui se réalisent pendant la phase de mise en œuvre.

Création de la base de données « phénomènes »

La création de la base de données « phénomènes » (détaillée au paragraphe II.3) permet d'aider à la réalisation d'une AMDE en facilitant la recherche des causes et des conséquences d'un phénomène ; nous distinguons trois types de causes susceptibles d'engendrer des phénomènes :

- erreurs commises lors du processus de construction,
- actions des agents environnementaux ou de leurs combinaisons,
- actions des composants voisins ; ce type de cause inclut les incompatibilités entre matériaux.

Formalisation de la démarche itérative de l'AMDE

L'AMDE est itérative dans la mesure où un phénomène peut engendrer (devenir la cause) d'un autre phénomène. De plus, un phénomène peut modifier le comportement (structure et fonctionnement) d'un produit, l'analyse qualitative est donc elle aussi une démarche itérative.
Nous avons ajouté une colonne « étape (d'itération) » aux tableaux d'AMDE existants ([FAU, 04], [LAI, 00], [ISD, 90], [AFN, 98a] et [CET, 97]) afin de mettre en valeur ce principe itératif et d'identifier plus facilement les enchaînements de phénomènes (scénarii).
Le tableau 39 est un extrait du tableau d'AMDE obtenu pour l'exemple de la fenêtre (correspondant au graphe événementiel des défaillances présenté à la figure 41 (page 119).

Fonction	Composant	Étape	Phénomène	Cause	Effet direct	Effet indirect
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Etre transparent	Vitrage	0	Abrasion	Lavage (machine non adaptée)	Dégradation de la visibilité	Fragilisation du matériau
Etre transparent	Vitrage	1	Déformation	Température Choc Chocs thermiques	-	Sollicitation mécanique des composants voisins
Résister mécaniquement	Joint d'adhérence	2	Craquelures	Déformation vitrage…étape 1	Perte de résistance mécanique	Dépôt dans la lame d'air

Tableau 39 : Entête du tableau d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets d'une fenêtre

La formalisation de la démarche itérative de l'analyse qualitative que nous proposons est schématisée à la figure 47.

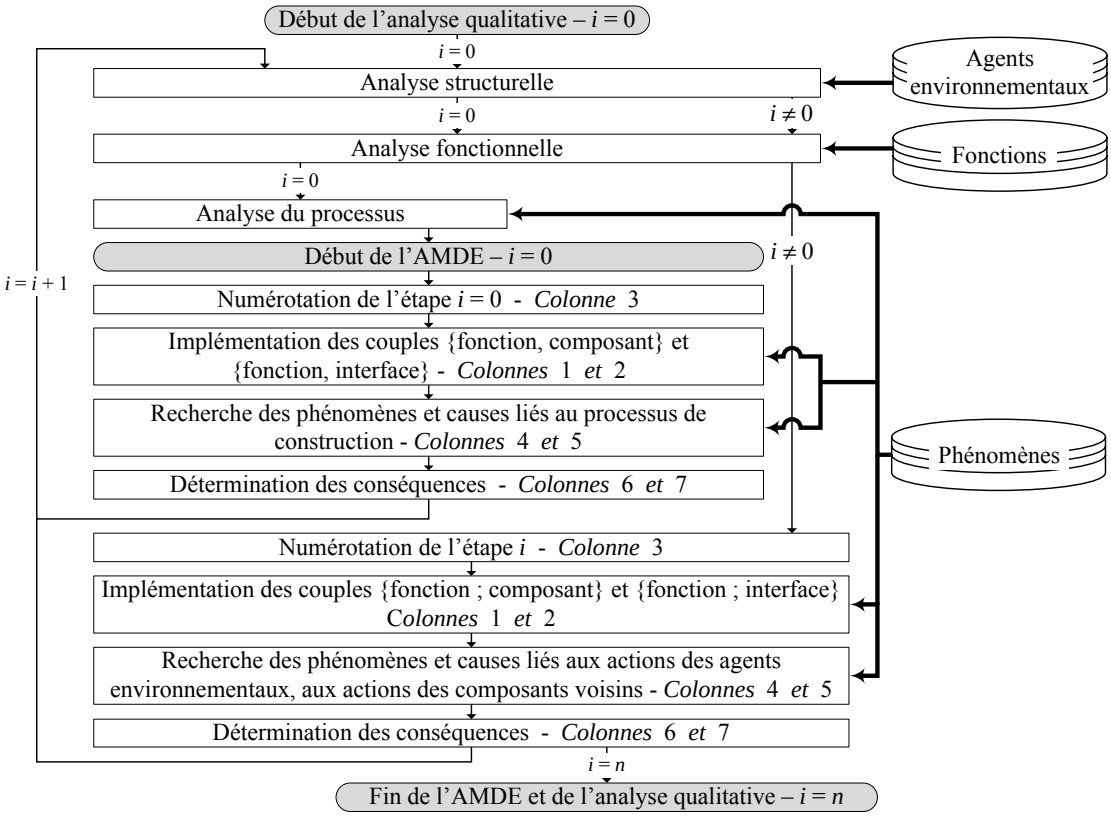


Figure 47 : Formalisation de la démarche itérative de l'analyse qualitative d'un produit de construction

Remarques : le « *i* » à la figure 47 est le compteur d'itération.
L'itération $i = n$ est atteinte lorsque l'ensemble des phénomènes connus sont notés dans le tableau d'AMDE.

IV.2. Analyse quantitative temporelle

IV.2.1. Objectif de l'analyse quantitative temporelle

L'analyse quantitative temporelle consiste à obtenir la paire {durée ; probabilité d'apparition} de tout point objectif, défini par une entité géométrique (matériau, composant, produit ou bâtiment) et une entité phénoménologique (phénomène, scénario, scénarii) à partir :

- de la connaissance des phénomènes, des scénarii et de leurs interactions obtenus à l'issue de l'analyse qualitative,
- de données temporelles et de probabilité d'apparition multi-sources relatives à tous points d'évaluation de l'espace des évaluations.

IV.2.2. Démarche de l'analyse quantitative temporelle

Les liens existants entre les méthodes quantitatives, les bases de données et cette étape d'analyse quantitative temporelle de la méthodologie sont présentés à la figure 48 (items écrits en noir avec des fonds grisés) :

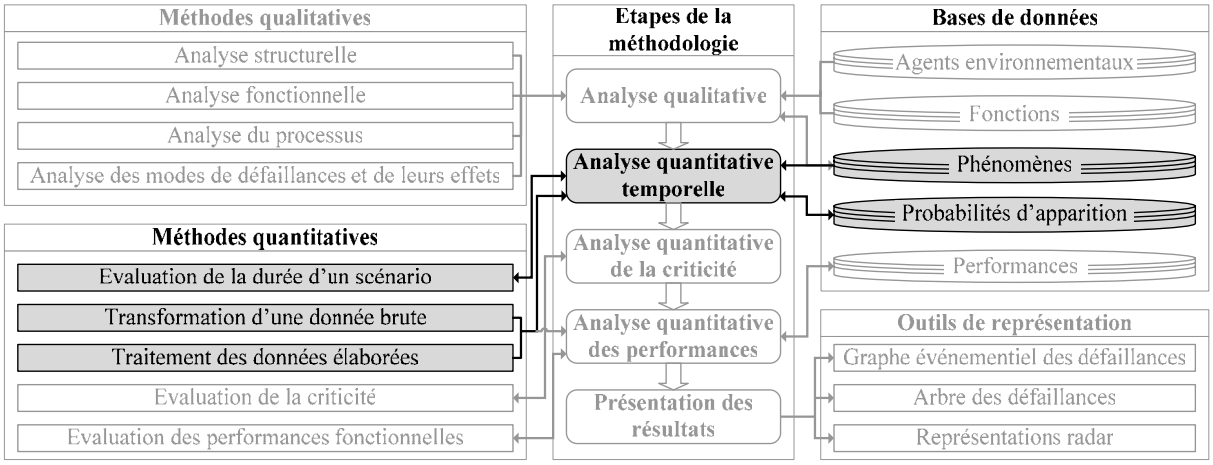


Figure 48 : Liens entre les propositions précédentes et l'étape d'analyse quantitative temporelle

L'analyse qualitative temporelle comprend quatre étapes principales détaillées à la figure 49.

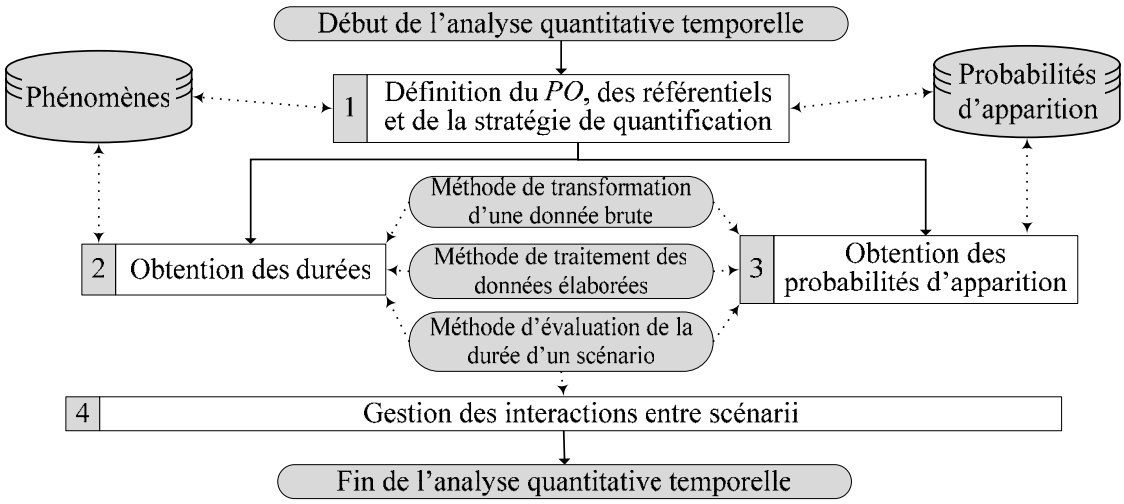


Figure 49 : Cheminement de l'analyse quantitative temporelle

Etape 1 : Définition du point objectif, des référentiels et de la stratégie de quantification.

La définition du **point objectif** consiste à décrire l'objectif final de l'étude en terme d'entité géométrique (matériau, composant, produit, bâtiment), d'entité phénoménologique (phénomène, scénario, scénarii) et de position sur l'axe temporel. Par exemple, on peut souhaiter définir la durée de vie d'une fenêtre en considérant tous ses scénarii en service, ou l'on peut également vouloir évaluer la durée de carbonatation du béton en service, etc.

Remarque : on ne définit pas ici l'entité fonctionnelle, puisqu'elle est intégrée uniquement lors de l'analyse quantitative des performances.

La définition des référentiels est explicitée au I.3.2-a et permet de définir les caractéristiques des données temporelles et de probabilité à rechercher dans les bases de données « phénomènes » et « probabilités d'apparition » et / ou à collecter.

La stratégie de quantification permet de définir quelles sont les méthodes à appliquer (unification, agrégation, estimation des probabilités d'apparition, gestion des interactions entre scénarii) en fonction du point objectif, des données (durées et probabilités) disponibles et de leur qualité. La stratégie de quantification résulte de l'algorithme général suivant :

Début

Evaluation des durées

SI « durées disponibles au point objectif » **ET** « qualité satisfaisante » **ALORS** « unification des durées »

SINON

SI « durées disponibles au point inférieur » **ET** « qualité satisfaisante » **ALORS** « unification au point inférieur » **PUIS** « agrégation jusqu'au point objectif »

SINON arrêt de l'évaluation sans résultat satisfaisant

Evaluation des probabilités d'apparition

SI « probabilités d'apparition au point objectif » **ET** « qualité satisfaisante » **ALORS** « unification des probabilités »

SINON

SI « probabilités d'apparition au point inférieur » **ET** « qualité satisfaisante » **ALORS** « unification au point inférieur » **PUIS** « agrégation jusqu'au point objectif »

SINON « estimation des probabilités d'apparition au niveau du phénomène » **PUIS** « agrégation jusqu'au point objectif » (si point objectif ≠ du phénomène)

Gestion des interactions entre scénarii

SI « entité phénoménologique du point objectif = scénarii » **ALORS** « gestion des interactions entre scénarii »

SINON « le résultat (durée et probabilité) a été obtenu précédemment »

Fin

Un arbre de choix de stratégie de quantification temporelle, plus détaillée que l'algorithme présenté ci-dessus, et applicable à tout point objectif et toutes données (durées et probabilités) disponibles est présenté en annexe 10.

Etapes 2 (obtention des durées), 3 (obtention des probabilités d'apparition) et 4 (gestion des interactions entre scénarii)

Ces étapes sont obtenues en appliquant la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario détaillée au I.3.

IV.3. Analyse quantitative de la criticité

IV.3.1. Objectif de l'analyse quantitative de la criticité

L'analyse quantitative de la criticité consiste dans un premier temps à évaluer la gravité des scénarii indépendants, obtenus à l'issue de l'analyse quantitative temporelle. Dans un deuxième temps elle permet de classer ces scénarii en trois classes de criticité (majeure, significative et mineure). Dans un troisième temps, l'analyse de la criticité procède à la hiérarchisation des scénarii « à criticité majeure » par ordre de criticité (produit de la probabilité d'apparition, de la durée et de la gravité d'un scénario pondéré par la croyance que l'on peut avoir dans les résultats obtenus).

IV.3.2. Démarche de l'analyse quantitative de la criticité

Les liens existants entre les méthodes quantitatives, les bases de données et cette étape d'analyse quantitative de la criticité de la méthodologie sont présentés à la figure 50 (items écrits en noir avec des fonds grisés) :

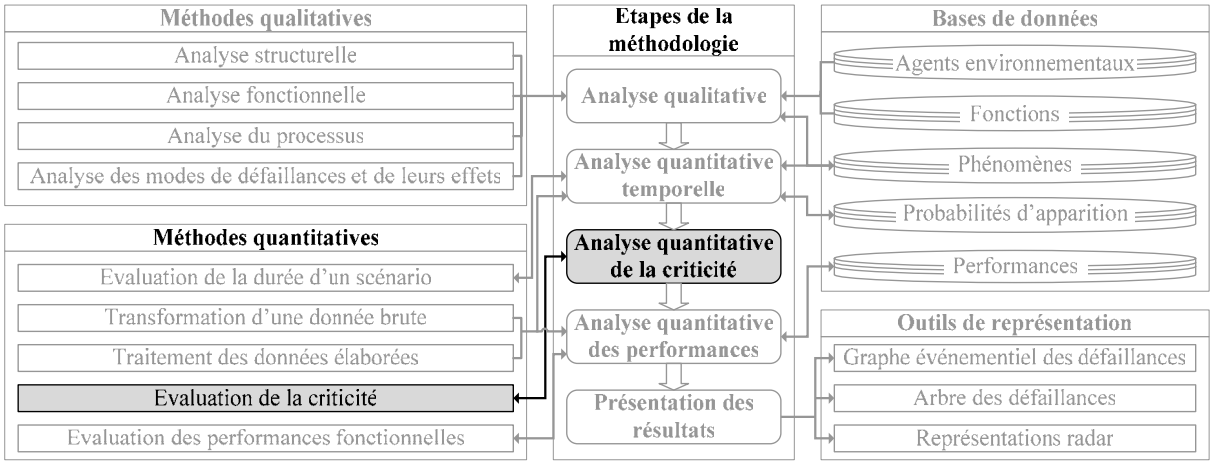


Figure 50 : Liens entre les propositions précédentes et l'étape d'analyse quantitative de la criticité

L'analyse quantitative de la criticité comprend trois étapes principales présentées à la figure 51.

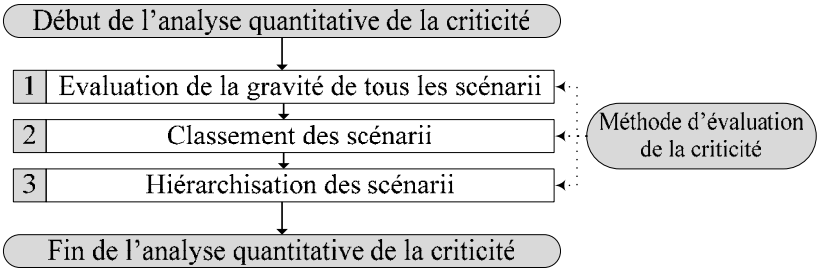


Figure 51 : Cheminement de l'analyse quantitative de la criticité

Etape 1 : Evaluation de la gravité de tous les scénarii

La gravité d'un scénario est obtenue en prenant la moyenne des estimations obtenues pour quatre impacts de ce scénario (impact sur la robustesse du produit, impact sur la maintenabilité du produit, impact sur la robustesse de l'ouvrage, impact sur la maintenabilité de l'ouvrage).

Etape 2 : Classement des scénarii
Le classement des scénarii consiste à :

- définir des seuils de criticité (inférieur et supérieur) de probabilité d'apparition, de durée et de gravité, afin d'établir les bornes de chaque classe de criticité,
- affecter une classe de criticité à chaque scénario par comparaison de ses valeurs de probabilité d'apparition, de durée et de gravité aux seuils de criticité.

Etape 3 : Hiérarchisation des scénarii
Les scénarii sont hiérarchisés par ordre de criticité décroissant (la valeur la plus élevée correspond à la criticité la plus forte). La criticité d'un scénario correspond au produit de sa probabilité d'apparition, de sa durée et de sa gravité pondéré par des poids liés à la croyance (ici prise égale à la probabilité de Smets) que l'on peut avoir en ces valeurs.

IV.4. Analyse quantitative des performances

IV.4.1. Objectif de l'analyse quantitative des performances

L'analyse quantitative des performances vise à obtenir le profil multi-performance d'un produit de construction, c'est-à-dire son état fonctionnel global, à un instant de son cycle de vie.
A cette vision globale « statique » des performances fonctionnelles d'un produit s'additionne la détermination de la cinétique d'évolution de ce profil au cours du temps.

Remarque : en faisant l'hypothèse que les scénarii qui ont le plus d'influence sur les performances d'un produit sont ceux classés à « criticité majeure » lors de l'analyse quantitative de la criticité, nous ne considérons ici que ces scénarii.

IV.4.2. Démarche de l'analyse quantitative des performances

Les liens existants entre les méthodes quantitatives, les bases de données et cette étape d'analyse quantitative des performances de la méthodologie sont présentés à la figure 52 (items écrits en noir avec des fonds grisés) :

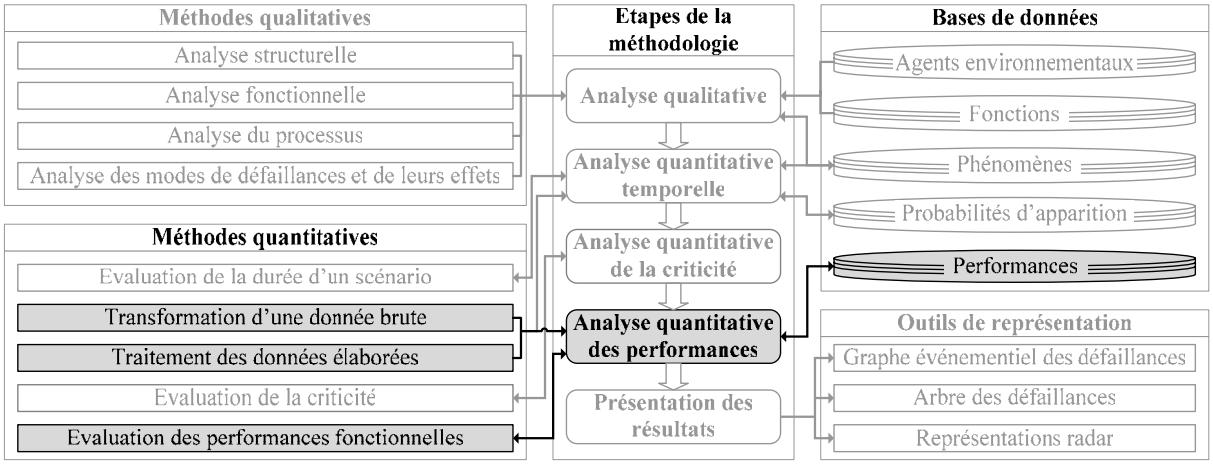


Figure 52 : Liens entre les propositions précédentes et l'étape d'analyse quantitative des performances

L'analyse quantitative des performances se décompose en trois étapes principales schématisées à la figure 53.

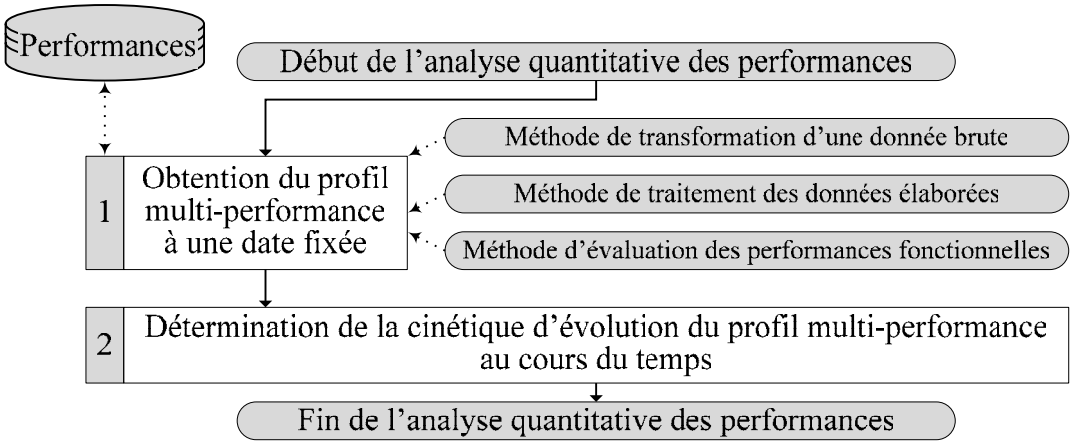


Figure 53 : Cheminement de l'analyse quantitative des performances

Etape 1 : Obtention du profil multi-performance à une date fixée

Le profil multi-performance d'un produit à une date fixée est obtenue :

- en déterminant la fonction de niveau de performance de chaque fonction du produit par :
  - collecte et transformation des données de caractéristiques intrinsèques, passage au niveau de performance de la fonction considérée,
  - utilisation des données de niveau de performances disponibles dans la base de données « performances »,
  - unification (méthode de traitement des données élaborées) de ces deux types de données,
- en déduisant de la fonction de niveau de performance et des états de dégradation des phénomènes associés le niveau de performance de chaque fonction du produit à la date fixée,
- en formalisant les combinaisons entre fonctions,
- en déterminant les niveaux de performance des combinaisons de fonction du produit à la date considérée.

Etape 2 : Détermination de la cinétique d'évolution du profil multi-performance au cours du temps

L'objectif de cette étape est d'avoir une vision « dynamique » des performances fonctionnelles d'un produit au cours du temps (par rapport à une vision « statique » du profil multi-performance à une date fixe).

Nous proposons alors un indicateur de cinétique – $Ic\mu^k$ – du niveau de performance d'une F_k sur un intervalle de temps Δt restreint ; il est défini par :

$$I\mu_{CT}^{k} = \frac{\left|\mu^k(t_i + \Delta t) - \mu^k(t_i)\right|}{\left|\Delta t\right|} \quad [37]$$

Une comparaison de la tendance générale, d'une part, des cinétiques de toutes les fonctions prises indépendamment et de toutes les combinaisons de fonctions, et d'autre part, des seuils de défaillance, permet de déduire la fonction ou la combinaison de fonctions qui est la plus susceptible d'entraîner la défaillance du produit : celle la plus proche de son seuil de défaillance et ayant une tendance générale d'augmentation de la baisse de performance.

IV.5. Présentation des résultats

IV.5.1. Objectif de la présentation des résultats

L'objectif de la présentation des résultats est d'avoir une représentation graphique des principaux résultats de la méthodologie à l'aide du graphe événementiel des défaillances, de l'arbre des défaillances et des représentations radar (« agents environnementaux » et « performances »).

IV.5.2. Démarche de la présentation de résultats

Les liens existants entre les outils de représentation et cette étape de présentation des résultats de la méthodologie sont présentés à la figure 54 (items écrits en noir avec des fonds grisés) :

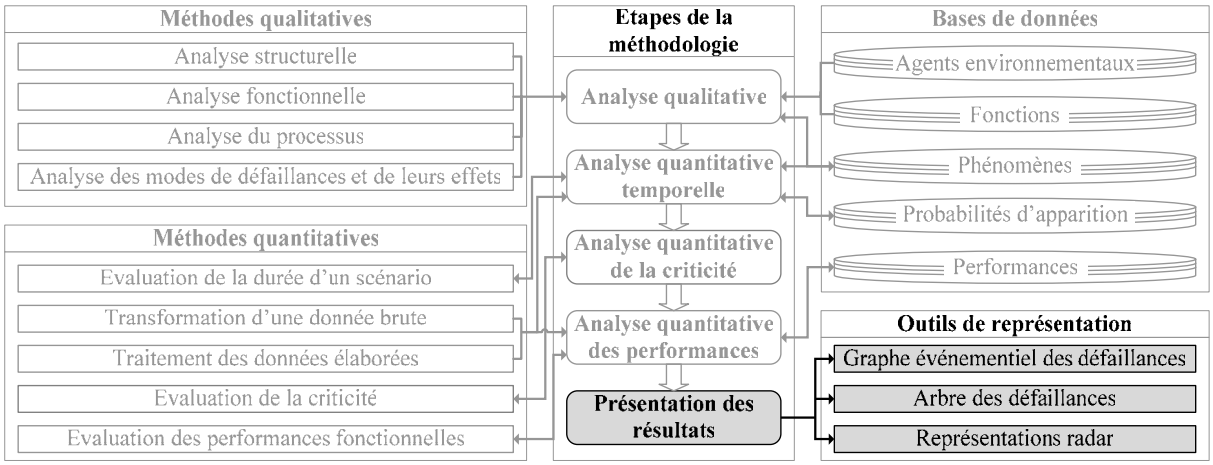


Figure 54 : Liens entre les propositions précédente et l'étape de présentation des résultats

Ces trois outils de représentation sont détaillés au chapitre III de cette partie.

Synthèse de la méthodologie

La méthodologie proposée d'évaluation du profil multi-performance d'un produit de construction au cours du temps comprend cinq étapes :

- **analyse qualitative** : elle intègre la modélisation fonctionnelle du produit, l'identification et la caractérisation de l'ensemble des phénomènes susceptibles de dégrader le produit au cours de son cycle de vie, la détermination des enchaînements de phénomènes (scénarii),
- **analyse quantitative temporelle** : elle consiste à quantifier temporellement les scénarii par unification puis agrégation de durées et de probabilités d'apparition multi-sources et multi-échelles (obtention d'un ensemble de scénarii indépendants),
- **analyse quantitative de la criticité** : elle aboutit à la hiérarchisation par ordre de criticité (combinaison de la probabilité d'apparition, de la durée et de la gravité d'un scénario) des scénarii indépendants,
- **analyse quantitative des performances** : elle permet d'obtenir le profil multi-performance d'un produit de construction au cours du temps à une date fixée. Elle vise également à prendre en compte la cinétique d'évolution de ce profil au cours du temps,
- **représentation des résultats** : elle est une synthèse graphique des principaux résultats de la méthodologie.

Chapitre V : Perspectives aux propositions

V.1. Perspectives aux méthodes

V.1.1. Perspectives à la méthode de transformation d'une donnée brute

La procédure de transformation d'une donnée brute est relativement longue à réaliser suivant le nombre et la nature des données brutes ; dans un souci d'accélération de cette procédure, il est envisageable d'automatiser le choix d'un modèle représentatif d'une donnée brute, l'estimation des paramètres de ce modèle et sa normalisation.

Cette méthode permet de transformer des données brutes existantes ; il serait également intéressant de développer une méthode de prédiction des lois d'évolution (variations de l'état de dégradation, de la probabilité d'apparition et du niveau de performance) en s'appuyant notamment sur les données élaborées contenues dans les bases de données « phénomènes », « probabilités d'apparition » et « performances ».

V.1.2. Perspectives à la méthode de traitement des données élaborées

La méthode de traitement des données élaborées est longue à réaliser dans la mesure où elle est manuelle ; il serait donc intéressant de l'automatiser en adaptant (la nature des données, l'évaluation de leur qualité et les résultats attendus étant différents) par exemple le logiciel de fusion des données de durées de vie EDIFICE développé par le CSTB sur la base des travaux de thèse de J. Lair [LAI, 00].

La démarche d'évaluation de la qualité des données proposée vise à décrire aussi précisément que possible l'erreur allouée aux données brutes, introduite par la transformation en données élaborées et générée par la méthode de traitement des données élaborées. L'inconvénient de cette description est le nombre important de critères à évaluer pour chaque donnée élaborée ; par conséquent, la variation de chaque critère impacte peu sur la valeur finale de la masse de croyance. Une étude de la sensibilité de cette évaluation constitue une perspective de ce travail de thèse (*cf.* II.3 de la partie C).
Une pondération des critères est envisageable en respectant le cadre théorique de l'analyse multicritère et en veillant à ce que cette pondération représente correctement l'importance relative de chacun des critères.

V.1.3. Perspectives à la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario

Notre démarche permet de prendre en compte les interactions entre phénomènes, mais pas leur couplage : nous n'évaluons pas l'impact (accélération ou ralentissement) d'un phénomène sur un autre phénomène. Il est possible, selon notre démarche, de collecter des données temporelles relatives au groupe de phénomènes incluant les phénomènes couplés ; nous agrégeons alors de l'échelle du groupe de phénomène à celle du scénario et non plus de celle du phénomène à celle du scénario. Une étude de l'intégration du couplage dans cette méthode serait cependant intéressante, notamment lorsque les données relatives au groupe de phénomènes ne sont pas disponibles.

Nous avons proposé une approche permettant de pallier la non connaissance des valeurs prises par les taux de transition ; il serait néanmoins intéressant de développer une méthode permettant d'obtenir ces valeurs.

V.1.4. Perspectives à la méthode d'évaluation de la criticité

Lors de l'évaluation de l'intensité des sollicitations, nous avons conclu des « dose-response functions » disponibles une tendance générale de forme exponentielle. Pour pouvoir affiner cette hypothèse et notre méthode pour tous les produits de construction dans tous les environnements possibles, il serait intéressant de poursuivre le travail d'élaboration de ces fonctions en le couplant avec un « Système d'Information Géographique » permettant de visualiser la répartition géographique des concentrations des agents environnementaux.

Nous proposons une estimation de la probabilité d'apparition d'un scénario qui prend en compte la qualité de la conception, il serait également intéressant d'étudier l'influence de la qualité de mise en œuvre.

L'évaluation de la gravité d'un scénario n'est basée que sur la première exigence essentielle, il est donc nécessaire de développer des démarches d'obtention des cinq autres critères globaux. Nous avons réalisé des agrégations au niveau des critères et des sous-critères sans prendre en compte les importances relatives de chacun d'eux ; ce n'est pas nécessairement réaliste et cette tendance s'accentuera lors de l'intégration des six exigences essentielles dans l'évaluation de la gravité d'un scénario. Il semble donc nécessaire d'étudier ce que l'analyse multicritère peut apporter à cette problématique.

V.1.5. Perspectives à la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles

Notre démarche d'évaluation de la fonction de niveau de performance d'une fonction du produit inclut la détermination de la fonction reliant une caractéristique intrinsèque à un niveau de performance. Il est nécessaire d'améliorer la précision de cette démarche, en développant par exemple des règles expertes permettant d'orienter la décision de l'utilisateur vers la forme de la fonction (linéaire, supra-linéaire, sous-linéaire) la plus appropriée à son cas d'étude.

V.2. Perspectives aux bases de données

L'aide à l'application de la méthodologie apportée par les bases de données « phénomènes », « probabilités d'apparition » et « performances » sera d'autant plus importante que ces bases de données contiendront d'autant plus d'information ; il est donc essentiel de poursuivre leur implémentation en réalisant de nouveaux cas d'étude et de favoriser l'implémentation directe de ces bases de données par des experts.
Pour la même raison, il est nécessaire de continuer de renseigner le champ « référentiel de classification » de la base de données « agents environnementaux ».

Lors de la réalisation de l'analyse fonctionnelle des applications, présentées en troisième partie de ce mémoire, avec des experts en matériaux et produits de construction, les désignations des fonctions proposées dans la base de données « fonctions » ont parfois été difficilement comprises. C'est la raison pour laquelle, il serait intéressant d'ajouter un autre champ pour définir les liaisons existant entre les fonctions proposées et les terminologies adoptées par ces experts.

V.3. Perspectives aux outils de représentation

Le format des outils de représentation développés dans ce mémoire coïncide avec la méthodologie proposée ; il évoluera donc certainement en fonction des évolutions de la méthodologie et des contraintes nécessaires à la génération automatique (développement informatique) de ces outils de représentation.

V.4. Perspectives à la méthodologie

La proposition de plusieurs environnements types permettrait de faciliter et d'accélérer l'analyse structurelle des produits de construction. Un environnement type pourrait être un environnement extérieur urbain, un environnement extérieur industriel, un environnement extérieur marin, un environnement intérieur climatisé, etc. Il s'agirait de définir les agents environnementaux présents dans ces environnements et les concentrations associées. Ainsi un utilisateur de la méthodologie pourrait s'il le souhaite uniquement sélectionner des types d'environnement pour chacun des milieux de son produit.
Le développement d'un Système d'Information Géographique (SIG) permettant de visualiser la répartition géographique des concentrations d'agents environnementaux allié à ces types d'environnement offrirait la possibilité à l'utilisateur de n'avoir qu'à définir le lieu où il souhaite implanter son produit. La déduction des types d'environnements associés à chacun des milieux de son produit serait alors directe.

L'analyse fonctionnelle proposée conduit à une modélisation binaire du comportement fonctionnel du produit : un composant assurera ou n'assurera pas un ensemble de fonction. La notion de « degré de participation » des composants aux fonctions n'est introduite qu'à l'analyse de la criticité.
Lors de la réalisation des applications, cette analyse a conduit à une détermination, non naturelle pour les experts, des couples {fonction, composant ou interface}. Il pourrait donc être intéressant d'intégrer cette notion de « degré de participation » directement à l'analyse fonctionnelle, en se basant par exemple sur l'analyse fonctionnelle proposée par [MAG, 92].

Synthèse générale des propositions

Nous avons présenté trois types de propositions, des méthodes, des bases de données et des outils de représentation, organisées dans une méthodologie globale.

Les méthodes proposés, apports scientifiques communs à différentes étapes de la méthodologie, sont les suivantes :

- **méthode de transformation d'une donnée brute** : obtention d'un format d'exploitation commun à des données multi-sources et de formats hétérogènes,
- **méthode de traitement des données élaborées** : exploitation de la complémentarité de données multi-sources et multi-échelles par unification et agrégation,
- **méthode d'évaluation de la durée d'un scénario** : quantification des durées et des probabilités d'apparition d'un ensemble de scénarii indépendants,
- **méthode d'évaluation de la criticité** : évaluation de la gravité, classement puis hiérarchisation par ordre de criticité des scénarii indépendants,
- **méthode d'évaluation des performances fonctionnelles** : obtention du profil multi-performance d'un produit à un instant de son cycle de vie et de la date correspondant à un profil multi-performance fixé.

Les bases de données « **agents environnementaux** » et « **fonctions** » ont pour rôle d'aider à la réalisation de l'analyse qualitative d'un produit. L'objectif des trois autres bases de données (« **phénomènes** », « **probabilités d'apparition** », « **performances** ») est, d'une part, de capitaliser les informations générées lors des analyses quantitatives, et d'autre part, d'aider à la réalisation de ces étapes (lorsque les informations sont disponibles).

Les trois outils de représentation proposés (**graphe événementiel des défaillances**, **arbre des défaillances** et **représentations radar**) permettent de synthétiser graphiquement les principaux résultats de la méthodologie.

Les liens créés entre ces propositions et les étapes de la méthodologie (**analyse qualitative**, **analyse quantitative temporelle**, **analyse quantitative de la criticité**, **analyse quantitative des performances** et **représentation des résultats**) sont présentés à la figure 55.

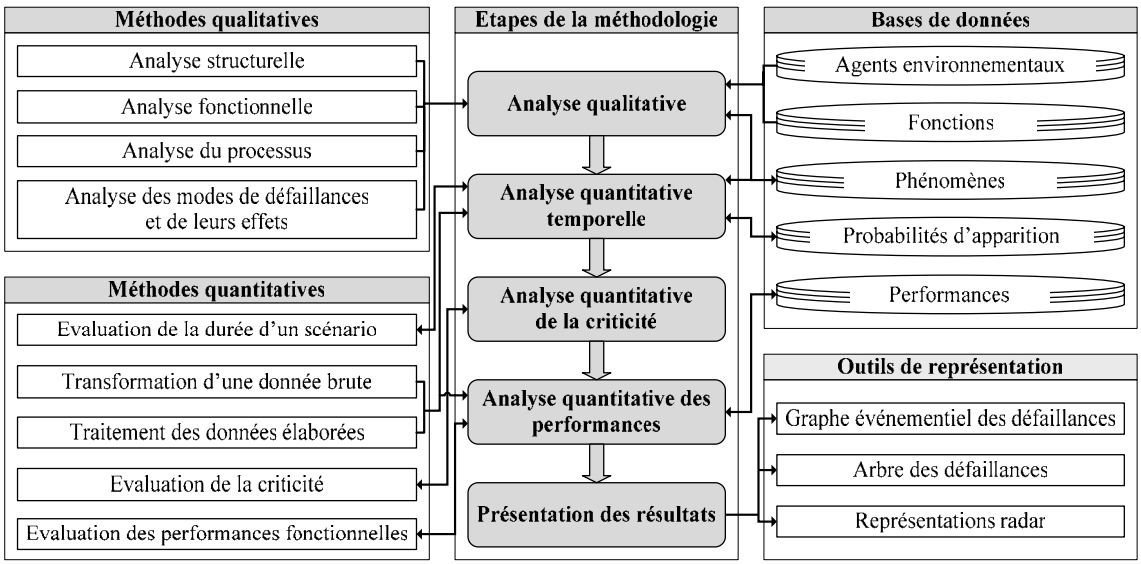


Figure 55 : Liens entre les propositions et la méthodologie

Partie C

Applications
Analyse critique
Développements industriels

Introduction aux applications, à l'analyse critique et aux développements industriels

Chapitre I : Applications

Chapitre II : Analyse critique

Chapitre III : Développements industriels

Synthèse aux applications, à l'analyse critique et aux développements industriels

Introduction aux applications, à l'analyse critique et aux développements industriels

Cette troisième partie vise à illustrer (*cf.* chapitre I), à valider, à proposer des simplifications (*cf.* chapitre II) et à présenter les développements possibles et envisageables (*cf.* chapitre III) de la méthodologie d'évaluation du profil multi-performance des produits de construction en service présentée en partie B de ce mémoire.

L'illustration et la validation de la méthodologie sont basées sur quatre applications, une fenêtre, un mur en béton, un mur en briques et un complexe mur béton et fenêtre, qui ont été réalisées selon différentes démarches et qui présentent différents intérêts.

Application de la fenêtre

L'analyse qualitative de cette application a été menée sous forme de réunions de travail successives avec un groupe d'experts pour certains en matériaux – tous types de matériaux – et pour d'autres en vitrages (de la division « Environnement, Produit et Ouvrages Durables » – EPOD – et du département « Enveloppe et Revêtements » – DER – du CSTB). Ce groupe rassemblait donc des personnes ayant des connaissances variant essentiellement entre le niveau « matériau » et le niveau « produit » de l'échelle géométrique.

Opportunité vis-à-vis de l'analyse qualitative

Cette application permet d'illustrer d'une part la démarche « classique » de consultation d'un groupe d'experts pour la réalisation de l'analyse qualitative et d'autre part la problématique de choix des niveaux d'étude les plus pertinents sur les échelles géométrique et phénoménologique ; l'intérêt de cette application tient à la fois à sa « complexité » vis-à-vis du nombre de composants, de leur agencement, et du nombre de matériaux constitutifs, et également au fait que son processus de construction présente trois phases principales : l'assemblage en usine, le transport et le stockage sur chantier, puis la mise en place dans la construction.

Opportunité vis-à-vis de l'analyse quantitative temporelle

Les données temporelles disponibles – collectées auprès des experts cités précédemment, dans la littérature et dans des projets de recherche sur la durabilité des fenêtres – aux niveaux des matériaux, des composants et du produit ont permis d'appliquer l'analyse quantitative temporelle.

Application du mur en béton

L'analyse qualitative de cette application a été réalisée en utilisant la base de données des phénomènes pré-remplie lors de l'étude d'une poutre en béton armé (dans le cadre du stage de fin d'étude du CUST en Génie Civil de M. Fabre à la division EPOD du CSTB).

Opportunité vis-à-vis des analyses quantitatives (temporelle, criticité et performances)

Cette application permet d'illustrer les trois analyses quantitatives puisque des données sont disponibles dans la littérature – les matériaux constitutifs de ce mur ont fait et font toujours l'objet de travaux de recherche – et sont complétées par des travaux spécifiques réalisés par B. Capra d'Oxand nous permettant d'évaluer la durée de certains des phénomènes affectant ce produit.

Application du mur en briques
L'analyse qualitative de cette application a été menée en collaboration avec le département « Building Environnement Sciences and Technologies » – BEST – du Politecnico di Milano à partir de nos connaissances respectives de la structure, du fonctionnement et des phénomènes de ce mur.

Opportunité vis-à-vis des analyses quantitatives (criticité et performances)
L'intérêt de la réalisation des analyses quantitatives pour cette application réside dans la comparaison d'une part des résultats obtenus pour deux types de murs différents ayant des fonctions semblables (mur en béton et mur en briques) et d'autre part des résultats obtenus par notre méthodologie et ceux résultant des travaux du BEST, notamment par la Performance Limits Method (PLM).

Application du complexe mur béton et fenêtre
L'analyse qualitative de cette application a été réalisée sur la base des connaissances acquises au niveau d'une part de la fenêtre et du mur et d'autres part de la littérature relative aux dégradations et pathologies de l'interface mur-fenêtre.

Opportunité vis-à-vis de l'analyse qualitative
Cette application correspond au passage d'une étude au niveau d'un produit à une étude au niveau d'un bâtiment, ce qui permet de mettre en évidence les problématiques associées : choix des granularités de l'analyse système et de la description des phénomènes et des scénarii, adaptabilité de l'AMDE, …

La figure 56 précise la ou les applications utilisées, et les numéros de paragraphes associés, pour illustrer chacune des étapes de la méthodologie globale.

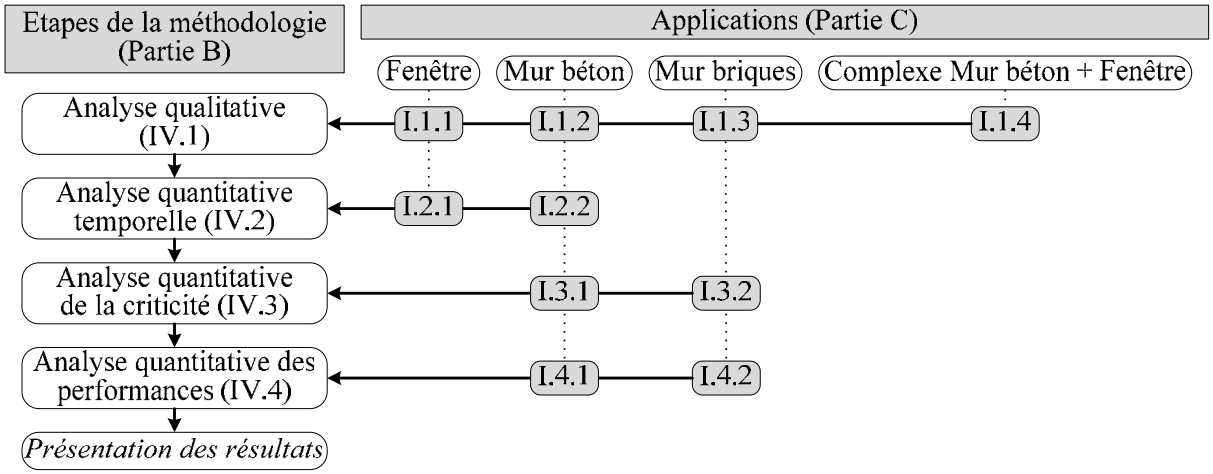


Figure 56 : Cartographie de l'utilisation des applications pour l'illustration des étapes de la méthodologie

La présentation des résultats permet d'illustrer les applications des analyses qualitative et quantitatives (*cf.* I.1 à I.4) et ne fait donc pas l'objet d'un paragraphe séparé.

Notes : nous avons choisi, dans le chapitre « applications » de cette partie, d'illustrer les différentes étapes de la méthodologie à l'aide des quatre applications plutôt que de dérouler quatre fois la méthodologie complète ; le lecteur plus particulièrement intéressé par l'une des quatre applications pourra alors se référer uniquement aux paragraphes qui lui sont dédiés.
Les hypothèses formulées au cours des applications (premier chapitre) sont détaillées au deuxième chapitre de cette partie.

Chapitre I : Applications

I.1. Applications de l'analyse qualitative

Nous présentons successivement dans ce paragraphe, les analyses qualitatives d'une fenêtre fixe, d'un mur en béton, d'un mur en briques et d'un complexe mur en béton et fenêtre.

I.1.1. Analyse qualitative d'une fenêtre fixe

Objectif de ce paragraphe

Il s'agit de détailler la démarche d'analyse du système d'un produit de construction par consultation d'un groupe d'experts et aboutissant à la connaissance de l'ensemble des scénarii renseignés (causes, composant(s) et fonction(s) associés, conséquences) de ce produit et de leurs interactions.

Hypothèses pour le système étudié

H1 : le produit étudié est une fenêtre fixe dans un environnement urbain « classique » de la métropole française.

H2 : nous nous intéressons uniquement aux conséquences des phénomènes sur le produit lui-même et non sur son environnement (autres produits, occupants, tiers,…).

H3 : nous prenons en compte l'ensemble des fonctions de ce produit de sa mise en œuvre jusqu'à la fin de son exploitation (sans prendre en compte les opérations de maintenance).

I.1.1.1. Application de l'analyse structurelle

La structure de la fenêtre, détaillée à la figure 57, a été choisie, avec le groupe d'expert, afin qu'elle soit d'une part réaliste et d'autre part qu'elle regroupe les trois types de fonctionnalités habituellement attendus pour un vitrage :

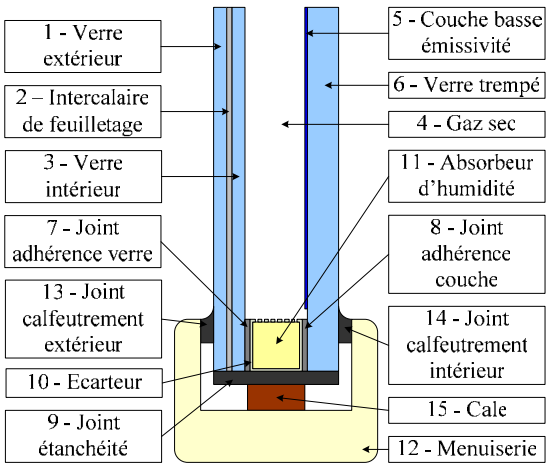
- **verre feuilleté** (*composants 1, 2 et 3*) : il s'agit d'un verre « anti-effraction » pour lequel les morceaux de verre (*composants 1 et 3*), une fois cassés, restent accrochés à l'intercalaire de feuilletage (*composant 2*),
- **verre trempé** (*composant 6*) : ce verre « sécurité » présente des bords non coupant lorsqu'il est cassé,
- **couche basse émissivité** (*composant 5*) : ce film offre un confort thermique en réfléchissant le rayonnement infrarouge, donc en atténuant le passage de la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur.

Les matériaux constitutifs des composants de cette fenêtre ont été sélectionnés dans la liste des matériaux de construction (*cf.* II.3.2).

Les choix qui ont été faits vis-à-vis des limites du système (fenêtre et son environnement) et de la granularité de décomposition sont les suivants :

- **limite spatiale** : elle correspond à l'enveloppe externe du vitrage et de la menuiserie, elle est délimitée par les composants 1, 13, 12, 14 et 6,
- **limite temporelle** : l'étude s'étend de la fin de la conception jusqu'à la fin de vie de la fenêtre en service sans prendre en compte les interventions de maintenance,
- **impacts recherchés** : cette étude se limite à la recherche des dégradations de la fenêtre sans intégrer les impacts sur ses environnements climatique, matériel (bâtiment dans lequel elle est intégrée, machines, véhicules, …) et humain (occupants, tiers, …),

- **granularité de décomposition** : elle est telle que chaque composant est constitué d'un seul matériau.



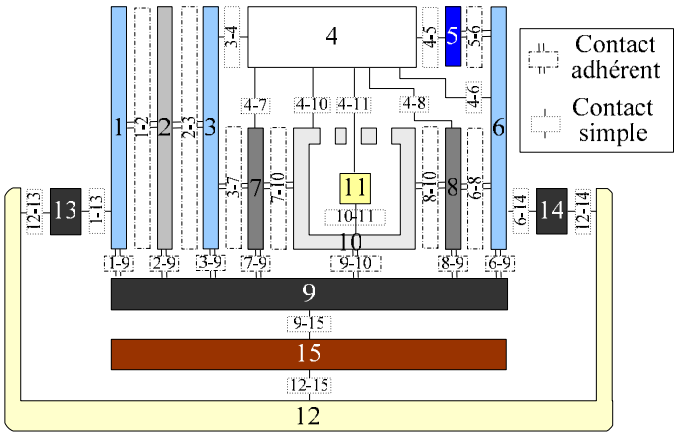
Graphe structurel

N°	Matériau	Géométrie
1	Verre	Surfacique
2	PVB	Surfacique
3	Verre	Surfacique
4	Air sec	Volumique
5	Oxyde métallique	Surfacique
6	Verre trempé	Surfacique
7	Silicone	Surfacique
8	Silicone	Surfacique
9	Butyle	Volumique
10	Aluminium	Volumique
11	Zéolite	Volumique
12	PVC	Volumique
13	EPDM	Volumique
14	EPDM	Volumique
15	Bois	Volumique

Caractérisation des composants

Figure 57 : Structure de la fenêtre étudiée

La connaissance de la géométrie des composants permet par la suite (lors de l'AMDE) de guider la recherche des phénomènes susceptibles d'affecter ces composants.
Le résultat de l'identification et de la caractérisation des interfaces est présenté à la figure 58.



Graphe topologique

N°	Géométrie	Mode de liaison
4-11	Volumique	Contact simple
1-2 ; 1-9 ; 2-3 ; 3-7 ; 3-9 ; 5-6 ; 6-8 ; 6-9 ; 7-10 ; 8-10 ; 9-10	Surfacique	Contact adhérent
1-13 ; 3-4 ; 4-5 ; 4-6 ; 4-10 ; 6-14 ; 9-15 ; 10-11 ; 12-13 ; 12-14 ; 12-15	Surfacique	Contact simple
2-9 ; 7-9 ; 8-9	Linéique	Contact adhérent
4-7 ; 4-8	Linéique	Contact simple

Caractérisation des interfaces

Figure 58 : Description des interfaces de la fenêtre

La connaissance des interfaces, de leur géométrie et de leur mode de liaison vise à faciliter la description du fonctionnement du produit (transmission des efforts, infiltration d'agents environnementaux, etc.) et la recherche des dégradations de surface et des incompatibilités entre matériaux.

Nous considérons que cette fenêtre est intégrée dans un mur de façade d'un bâtiment ; par conséquent, son environnement climatique et d'usage est décomposé en un milieu extérieur (du côté du verre feuilleté) et en un milieu intérieur (du côté du verre trempé). Les agents environnementaux de ces deux milieux ont été sélectionnés dans la base de données des agents environnementaux (dont un extrait est présenté en annexe 8) ; les agents environnementaux du milieu extérieur sont listés dans le tableau 40. Le choix de l'environnement (urbain « classique » de la métropole française) implique que la concentration des agents environnementaux est normale.

Catégorie	Agent environnemental
Liquides	Eau, détergents, solvants, huiles et graisses, polluants
Vapeurs	Humidité, sécheresse
Gaz	Composants principaux et autres composants de l'atmosphère, polluants, particules en suspension
Radiations	U.V. (lumière), rayonnement infrarouge (chaleur), rayonnement artificiel (éclairage)
Températures	Elevée, basse, cyclique (cycle gel / dégel), chocs thermiques

Catégorie	Agent environnemental
Animaux et bactéries	Vertébrés (oiseaux, petits mammifères,…), invertébrés (vers, insectes, arachnides,…), déjections animales, bactéries
Végétaux et champignons	Racines, algues, champignons, mousses et lichens, poussières et salissures
Bruits	Bruit aérien extérieur, bruit d'impact au sol, bruit d'équipement
Actions mécaniques	Charge ponctuelle statique, pression, vibration, vent, frottement, chocs durs et mous
Précipitations	Grêle, neige, pluie, brouillard

Tableau 40 : Liste des agents environnementaux du milieu extérieur de la fenêtre fixe

I.1.1.2. Application de l'analyse fonctionnelle

Les utilisateurs décrivent les fonctions attendues par cette fenêtre fixe ainsi :

- permettre la visibilité et laisser passer la lumière à travers la surface vitrée,
- être une barrière aux sollicitations climatiques,
- résister mécaniquement à ces sollicitations climatiques,
- réfléchir le rayonnement infrarouge,
- être conforme aux réglementations en vigueur.

La démarche d'analyse fonctionnelle consiste alors à sélectionner dans la base de données des fonctions (présentée au II.2 de la partie B et en annexe 9) les fonctions principales, notées *Fpi*, correspondant aux fonctions citées ci-dessus et les fonctions secondaires, notées *Fsi*, permettant de réaliser ces fonctions principales, puis à déterminer les composants et les interfaces assurant ces fonctions. Le résultat de cette analyse pour la fenêtre est présentée au tableau 41.

Fonction	Réf.	Composant	Interface
Etre transparent	Fp_1	1, 2, 3, 4, 5, 6	1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6
Etre étanche	Fp_2	1, 6, 12, 13, 14	1-13, 6-14, 12-13, 12-14
Stopper le rayonnement infrarouge	Fp_3	5	
Stopper les températures et le bruit	Fp_4	Tous	
Absorber la vapeur	Fs_5	11	
Résister mécaniquement	Fp_6	Tous	
Etre intègre	Fs_7	Tous	Toutes
Maintenir en position	Fs_8	2, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 15	
Adhérer	Fs_9		Les « contact adhérent »
Etre conforme aux exigences	Fp_{10}	Tous	Toutes

Tableau 41 : Fonctions de la fenêtre et composants / interfaces associé(e)s

Remarque : les fonctions « résister mécaniquement » décrivent la capacité des composants à résister aux *flux de force* des agents environnementaux (définis ci-après) alors que les fonctions « être intègre » caractérisent la capacité des composants à résister (du fait de leurs propriétés mécaniques, physiques et chimiques) aux *flux de contact* des agents environnementaux.

Le graphe fonctionnel, schématisant l'évolution de l'environnement au contact et/ou à travers le produit, est ensuite créé à partir de la connaissance de la composition de l'environnement de la fenêtre (milieux extérieur et intérieur), de la définition des types de flux des catégories environnementales (détaillée au tableau 42), de la connaissance des fonctions assurées par chaque composant / interface et des règles expertes (décrites au II.2.3 de la partie B).

Catégorie de flux	Flux de force	Flux de passage	Flux de contact
Flux de liquides / vapeurs / gaz			✓
Flux de radiations / températures		✓	✓
Flux des animaux et des bactéries / de précipitations	✓		✓
Flux des végétaux et des champignons			✓
Flux de bruits / d'actions mécaniques	✓		

Tableau 42 : Type de flux des catégories environnementales

Le graphe fonctionnel de la fenêtre est ici décomposé en sept sous-graphes fonctionnels afin de le rendre plus lisible. Le sous-graphe fonctionnel correspondant au flux de rayonnement infrarouge provenant du milieu extérieur est présenté à la figure 59, les six autres sous-graphes fonctionnels sont détaillés en annexe 10.

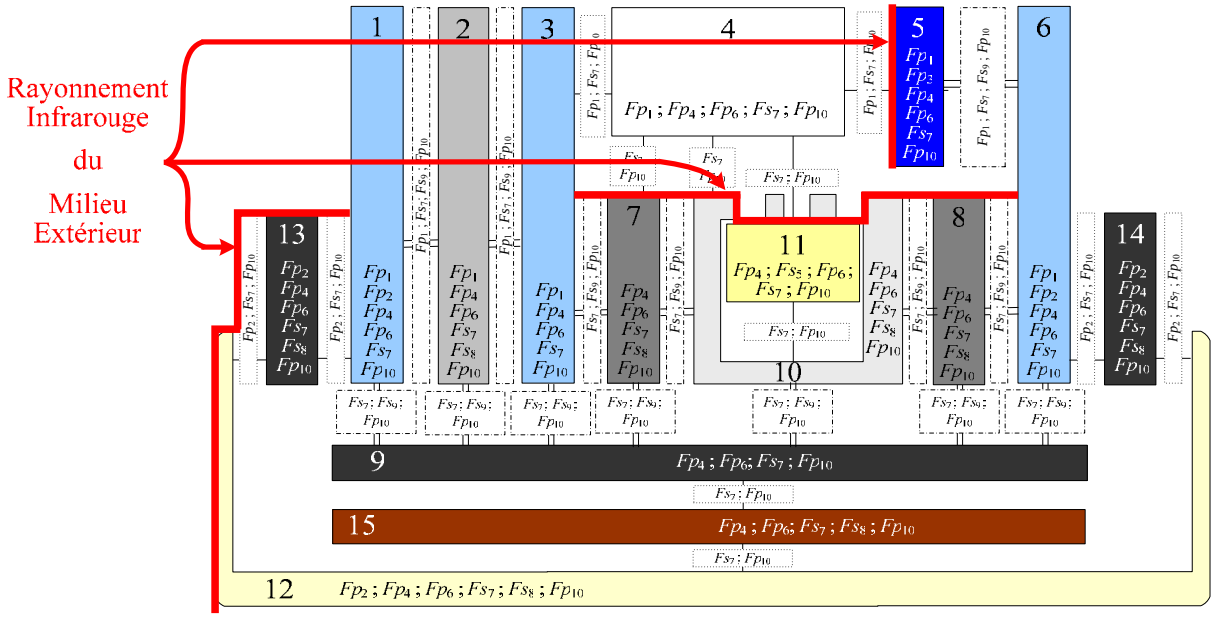


Figure 59 : Sous-graphe fonctionnel – flux de rayonnement infrarouge extérieur

A la figure 59, les fonctions assurées par les différents composants et interfaces sont notées (selon les références définies au tableau 41) sur ces composants et interfaces ; les flèches schématisent le flux de rayonnement infrarouge provenant de l'extérieur à travers le produit, et les traits arrêtant ces flèches délimitent les composants stoppant ce flux soit du fait de leur fonction spécifique (par exemple, la couche basse émissivité – *composant* 5) soit du fait de leurs propriétés physiques (par exemple, l'écarteur – *composant* 10).
De ces graphes fonctionnels, il est possible de déduire la nature des contacts (direct ou indirect) – définie au IV.1.2-a de la partie B – entre les catégories environnementales et les composants / interfaces de la fenêtre ; ceci constitue une information utile à l'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène (*cf.* I.3.2-c-2 de la partie B). Le résultat de cette définition pour la fenêtre est détaillé au tableau 43.

Milieu / Catégorie environnementale		Contact	Composant	Interface
Extérieur	Liquides, vapeurs, gaz, animaux, végétaux, précipitations, radiations, températures, bruits, actions mécaniques	Direct	1, 12, 13	1-13, 12-13
	Radiations – UV	Indirect	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14	1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 4-10, 4-7, 4-8, 4-6, 4-11
	Radiations – IR	Indirect	2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11	1-2, 2-3, 3-4, 4-7, 4-10, 4-11, 4-5, 4-8
	Actions mécaniques - sauf frottements, températures, bruits, animaux (force), précipitations (force)	Indirect	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15	Toutes
Intérieur	Liquides, vapeurs, gaz, bactéries, végétaux, radiations, températures, bruits, actions mécaniques	Direct	6, 12, 14	6-14, 12-14
	Radiations – lumières artificielles	Indirect	1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13	1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 4-7, 4-8, 4-10, 4-11, 5-6
	Radiations – IR	Indirect	5	5-6
	Températures, bruits, actions mécaniques - sauf frottements	Indirect	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15	Toutes

Tableau 43 : Contacts entre les catégories environnementales et les composants et interfaces de la fenêtre

I.1.1.3. Application de l'analyse du processus

L'analyse du processus a consisté à déterminer les différentes étapes de la fabrication en usine, du transport de l'usine au chantier et du stockage sur chantier, puis à identifier les dégradations, leurs causes et conséquences, associées à chaque étape. Un extrait de cette analyse est présenté au tableau 44 et l'analyse complète est en annexe 11.

Etape	Composant	Phénomène	Cause		Effet
Emargement de la couche basse émissivité par abrasion	5, 6	Absence d'émargement	intervenant	manipulateur	Contact entre la couche basse émissivité et joint d'adhérence couche
Mise en forme de l'écarteur	10, 11	Perte du disséquant	intervenant	opérateur	Détérioration de l'absorption
			méthode	mode opératoire	
Collage de l'écarteur sur le verre feuilleté, puis le joint d'adhérence couche sur l'écarteur	1, 2, 3, 7, 10, 11	Matériau insuffisant	intervenant	opérateur	Influence sur l'adhérence et l'étanchéité
Assemblage du double vitrage et de la menuiserie	1 à 15	Cale inappropriée	intervenant	opérateur	Mise en compression du vitrage
		Vrillement (joint calfeutrement extérieur)	intervenant	opérateur	Fragilisation du matériau Sollicitation mécanique du vitrage
			matériau	qualité	

Tableau 44 : Extrait du tableau d'analyse du processus de la fenêtre

Remarque : la méthode des 5M (intervenant ou main d'œuvre, moyen, matériau, environnement ou milieu) permet de guider la recherche des causes des phénomènes.

I.1.1.4. Application de l'AMDE

Démarche

L'implémentation d'un tableau AMDE (*cf.* tableau 39 de la partie B) – regroupant le résultat de cette analyse – par consultation d'un groupe d'experts comprend six phases décrites à la page suivante et illustrées à l'aide d'un extrait de l'AMDE de la fenêtre fixe.

Les abréviations utilisées ci-après ont les significations suivantes : DiAb ou DeAb (diminution ou défaillance de l'absorption), DiRM (diminution de la résistance mécanique), DiIn ou DeIn (diminution ou défaillance de l'intégrité), NC (non conformité), DiATB (Diminution de l'atténuation de la température et des bruits), DeET (Défaillance de l'étanchéité), DiMP (Diminution du maintien en position), PEs (Perte d'esthétisme), PIAE (Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux).
Dans la colonne « cause » : « ; » signifie « OU », « + » → « ET », « + év. » → « ET éventuellement », « ét. » → « étape ».

Phase 1 : Remplir les colonnes « fonction » et « élément » à partir du modèle fonctionnel du produit.

Fonction	Elément	Etape	Mode	Cause	Effet direct	Effet indirect
Absorber la Vapeur (Fs_5)	Absorbeur d'humidité (11)					
Etre intègre (Fs_7)	Joint d'étanchéité (9)					
Etre étanche (Fp_2)	Menuiserie (12)					
Etre intègre (Fs_7)	Ecarteur (10)					
…	…					

Phase 2 : Identifier les phénomènes liés au processus de construction (« Etape » = 0) à l'aide de l'analyse du processus (colonnes « mode » et « causes ») et du modèle fonctionnel (colonnes « effet direct » et « effet indirect »)

Fo.	El.	Et.	Mode	Cause	Effet direct	Effet indirect
Fs_5	11	0	Perte de matériau	Mise en forme du 10 (opérateur, mode opératoire)	DiAb	DiRM ; DiIn ; NC
Fs_7	9					
Fp_2	12					
Fs_7	10					
…	…	…	…	…	…	…

Rappel : effet direct → conséquence sur {même fonction ; même composant} et effet indirect → conséquence sur {même ou autre fonction ; autre composant} ; ici les composants connexes à l'absorbeur d'humidité susceptibles d'être affectés par ce phénomène sont les composants 4 et 10.

Phase 3 : Identifier les phénomènes liés aux sollicitations en phase d'exploitation du produit (« Etape » ≥ 1) en considérant qu'il n'a pas été dégradé lors de son processus de construction. Cette identification est réalisée par consultation d'expert (ou recherche dans la base de données des phénomènes, *cf.* II.3 de la partie B) et à l'aide du modèle fonctionnel pour les colonnes « effet direct » et « effet indirect ».

Fo.	El.	Et.	Mode	Cause	Effet direct	Effet indirect
Fs_7	9	1	Durcissement	Oxygène ; ozone ; T°C élevée	DiIn	DiRM ; DiATB ; Influence sur l'adhérence et l'étanchéité de l'interface
Fp_2	12	1	Fissuration	Choc dur + T°C < 10°C ; efforts de compression, de traction, de cisaillement	DeEt	DiRM ; DiIn ; DiMP ; DiATB ; PEs
Fs_7	10					
…	…	…	…	…	…	…

Phase 4 : Modifier éventuellement les analyses structurelle et fonctionnelle en fonction des conséquences des phénomènes identifiés aux phases 2 et 3 et ajouter éventuellement les nouvelles paires {fonction ; composant} dans le tableau AMDE.

Phase 5 : Identifier les phénomènes qui succèdent aux phénomènes listés lors des phases 2 et 3.

Fo.	El.	Et.	Mode	Cause	Effet direct	Effet indirect
Fs_7	9	2	Fissuration	Fatigue due au Durcissement du 9 …ét. 1	DiIn	DiRM ; PIAE
Fs_7	10	3	Corrosion par piqûres	[Humidité ; Produits halogènes (chlore, fluore, brome, iode)] due à [Fissuration du 9 … ét.2 + Fissuration du 12 … ét.1]	DeIn	DiRM
Fs_7	10	4	Perforation	Corrosion par piqûres du 10 … ét.3	DeIn	DiRM ; DiMP ; PIAE
Fs_5	11	5	Saturation	Humidité due à [Perforation du 10 … ét.4 + év. Perte de matériau du 11 … ét. 0]	DeAb	Influence sur l'humidité du gaz sec
…	…	…	…	…	…	…

Phase 6 : Itération des phases 4 et 5 jusqu'à ce que tous les phénomènes connus aient été notés dans le tableau AMDE.

Remarque : l'intérêt de la phase 3 de l'AMDE est de ne pas omettre de scénarii dus uniquement aux agents environnementaux en service et non dus à des erreurs de processus.

Scénarii génériques

Les scénarii génériques permettent de présenter, à une échelle de description moins précise que celle des « scénarii élémentaires » c'est-à-dire ceux issus directement de l'AMDE, les principaux enchaînements de phénomènes de dégradation d'un produit de construction.
En considérant un niveau de l'échelle géométrique intermédiaire entre le niveau du composant et celui du produit, la fenêtre peut être vue comme l'assemblage de trois groupes de composants :

- **groupe 1 – GC1** : constitué des composants 1 à 6, il assure la visibilité à travers la fenêtre et la réflexion du rayonnement infrarouge,
- **groupe 2 – GC2** : constitué des composants 7 à 11, il assure l'étanchéité aux agents environnementaux et le maintien en position du groupe 1,
- **groupe 3 – GC3** : constitué des composants 12 à 15, il assure l'étanchéité aux agents environnementaux et le maintien en position du groupe 2.

Les trois groupes de composants contribuent au confort acoustique et thermique de la fenêtre.

A partir de cette décomposition de la fenêtre en groupes de composants, l'ensemble des scénarii de dégradation de la fenêtre se rapportent aux six scénarii génériques suivants :

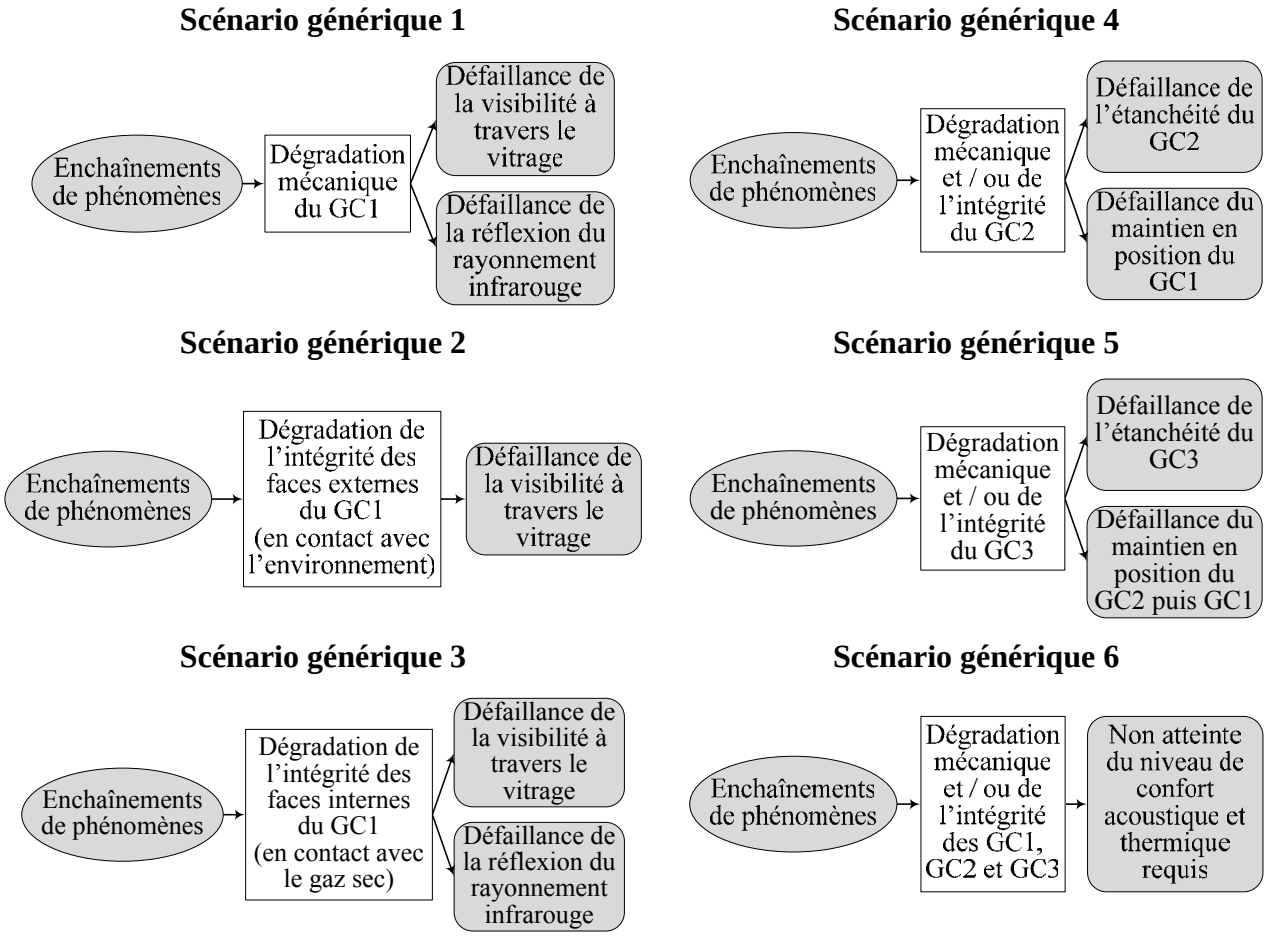


Figure 60 : Scénarii génériques de la fenêtre fixe

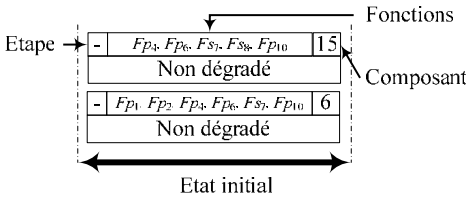
Remarque : ces six scénarii génériques sont en interaction, par exemple le scénario générique 5 peut entraîner le scénario générique 1.

Représentation des scénarii

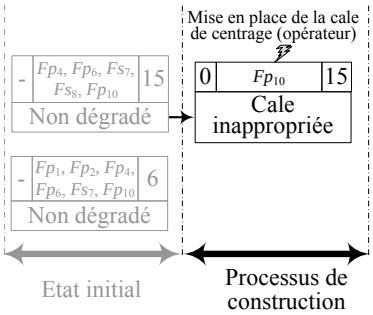
Nous présentons les enchaînements de phénomènes listés dans le tableau AMDE, c'est-à-dire les scénarii « élémentaires », à l'aide d'un graphe événementiel des défaillances (détaillé au III.1 de la partie B), afin de les rendre plus lisibles.

L'implémentation d'un graphe événementiel des défaillances (GED) comprend quatre phases décrites ci-après et illustrées à l'aide d'un extrait du GED de la fenêtre fixe.

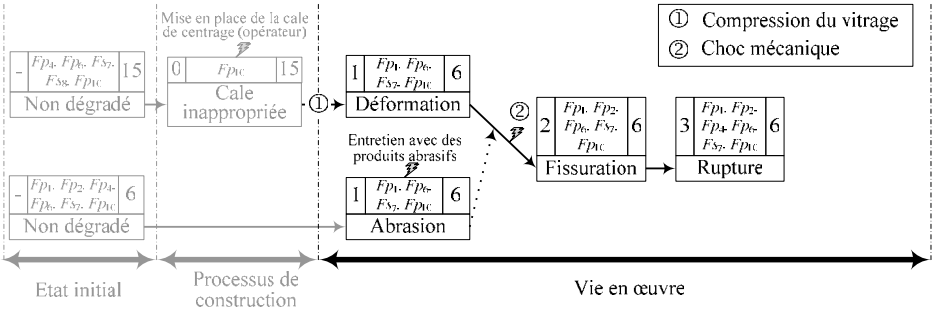
Phase 1 : Noter sous forme de « blocs à quatre cases » tous les composants, toutes les interfaces et les fonctions (à partir des références définies à la figure 57 et au tableau 41) qu'ils assurent dans la zone « état initial ».



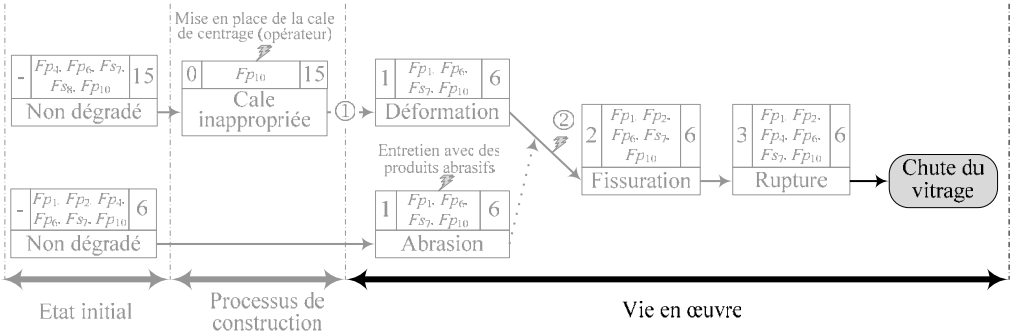
Phase 2 : Noter sous forme de « blocs à quatre cases » les phénomènes liés au processus de construction, les composants et les fonctions affectés par ces phénomènes dans la zone « processus de construction ». Les causes de ces phénomènes sont notés au dessus de chaque bloc. L'étape d'itération de l'analyse qualitative est ici égale à 0.



Phase 3 : Noter sous forme de « blocs à quatre cases » les phénomènes liés à l'exploitation de la fenêtre, les composants et les fonctions affectés par ces phénomènes dans la zone « vie en œuvre ». Les causes sont placées sur les blocs lorsqu'elles entraînent à elles seules le phénomène associé, ou sur les flèches séparant deux phénomènes lorsque le phénomène postérieur ne peut démarrer que si le phénomène antérieur se réalise et que la cause (sollicitation environnementale) est présente. Les blocs sont reliés par des flèches en traits continus lorsque la réalisation du phénomène antérieur est nécessaire au démarrage du phénomène postérieur, ou par des flèches en traits pointillés lorsque le phénomène antérieur est susceptible d'accélérer la cinétique du phénomène postérieur. L'étape d'itération prend ici sa valeur dans [1 ; *n*], où *n* est le nombre maximum d'itération de l'analyse qualitative.



Phase 4 : Ecrire explicitement à la fin des scénarii, les fonctions principales affectées par ces scénarii.



Scénarii retenus

Parmi tous les scénarii identifiés par l'AMDE, certains sont plus critiques que d'autres. Par conséquent, nous procédons à une sélection des scénarii qui nous semblent les plus critiques en nous basant sur notre connaissance du comportement mécanique et physique de cette fenêtre ; ils sont présentés à la figure 61. Un extrait du tableau AMDE complet de la fenêtre est présenté en annexe 12.

Cette première sélection vise à réduire le nombre des scénarii à quantifier temporellement, puisque l'analyse quantitative de la criticité proposée (*cf.* IV.3 de la partie B) permet de hiérarchiser plus finement l'ensemble des scénarii par ordre de criticité mais est longue à appliquer.

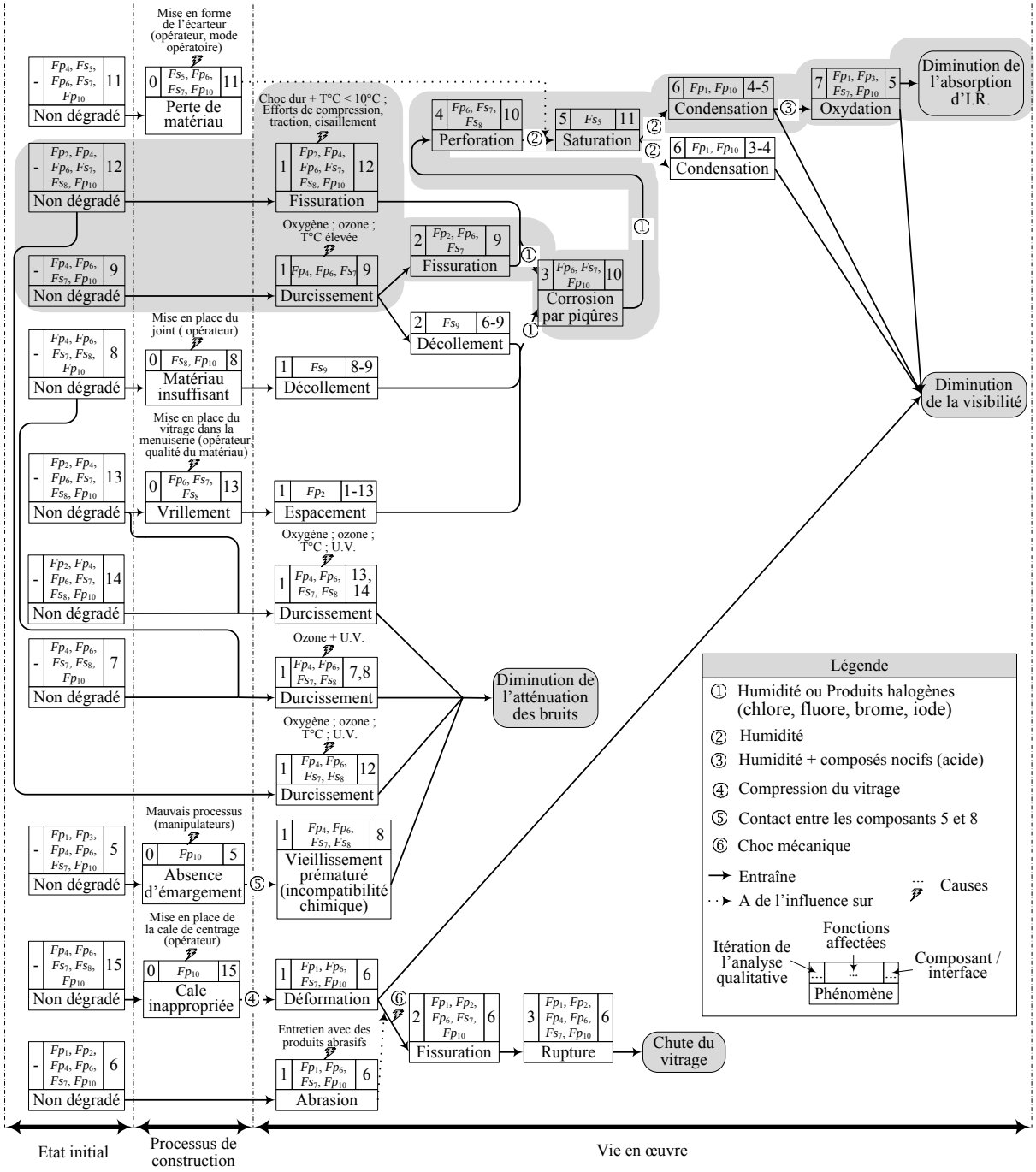


Figure 61 : Sélection de scénarii de dégradation de la fenêtre

Le graphe événementiel des défaillances (extrait du graphe complet de la fenêtre) à la figure 61 regroupe onze scénarii qui sont (pour certains) en interactions les uns avec les autres. Un exemple de scénario (sur fond grisé à la figure 61) est l'enchaînement du *durcissement* du joint d'étanchéité (9) suivi de la *fissuration* de ce joint (9), qui liés à la *fissuration* de la menuiserie (12) entraîne la *corrosion par piqûres* puis la *perforation* de l'écarteur (10), qui engendre la *saturation* de l'absorbeur d'humidité (11), puis la *condensation* sur la face interne de la couche basse émissivité (4-5) et enfin l'*oxydation* de cette couche basse émissivité (5) qui conduit à une *diminution de l'absorption d'infrarouges* et à une *diminution de la visibilité* (fonctions principales de la fenêtre).

I.1.1.5. Discussion

Le choix de la granularité de décomposition est lié aux connaissances et aux intérêts des experts du groupe de travail et influence la précision des scénarii obtenus à l'issue de l'AMDE.
L'objectif de cette étude était de connaître le comportement global de cette fenêtre et non uniquement le comportement du verre feuilleté et du verre trempé ; c'est la raison pour laquelle le verre feuilleté n'a été modélisé qu'en trois composants (n° 1 à 3) alors qu'en réalité il peut comporter jusqu'à sept couches ; de même, le verre trempé correspond à un seul composant (n° 5) alors que nous aurions pu le considérer comme un assemblage de trois composants, deux couches externes plus résistantes que la couche centrale.
Ce choix de granularité géométrique est cependant relativement précis et engendre un nombre de phénomènes conséquent ; en effet, la rupture d'un verre feuilleté modélisé avec un seul composant aurait pu être décrite par un seul phénomène « rupture du verre feuilleté » alors qu'en le modélisant par trois composants ce phénomène de rupture requiert la succession – non nécessairement dans l'ordre présenté – de trois phénomènes : « rupture du verre extérieur », « rupture du verre intérieur », « rupture de l'intercalaire de feuilletage ».

Le choix du niveau d'étude des scénarii (génériques ou élémentaires) dépend de la précision attendue pour cette étude, les scénarii génériques seront suffisants pour connaître le comportement global de la fenêtre et on s'orientera vers l'identification des scénarii élémentaires si l'on cherche à caractériser un scénario spécifique (par exemple pour le montage d'un protocole d'essai).
La précision des résultats de l'analyse quantitative temporelle dépend également de ce niveau d'étude sur l'échelle phénoménologique ; en effet, l'évaluation de la durée de vie de la fenêtre sera plus réaliste si les interactions entre scénarii élémentaires sont identifiées et prises en compte.

I.1.2. Analyse qualitative d'un mur en béton

Objectif de ce paragraphe
Il s'agit de présenter la structure, le fonctionnement et les scénarii de dégradation du mur en béton que nous utiliserons pour l'application des analyses quantitatives (temporelle, de la criticité, des performances). La recherche des phénomènes de ce mur est menée par consultation de la base de données des phénomènes, contrairement à l'application précédente ou cette recherche consistait à consulter directement un groupe d'experts.

Hypothèses pour le système étudié

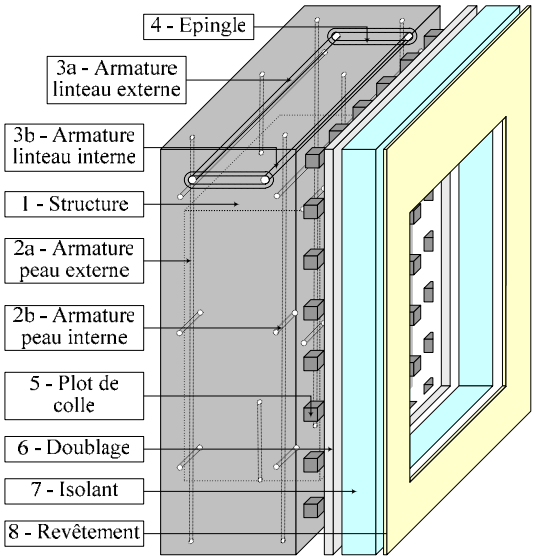
H1 : le produit étudié est un mur en béton non porteur recouvert d'un complexe isolant et d'un revêtement intérieur dans un environnement urbain « classique » de la métropole française. Ce mur est non porteur pour être comparable au mur en briques, *cf.* I.1.3, et comporte une ouverture pour pouvoir y intégrer la fenêtre fixe, *cf.* I.1.4).

Nous considérons ici les hypothèses H2 et H3 formulées pour l'application de la fenêtre fixe.

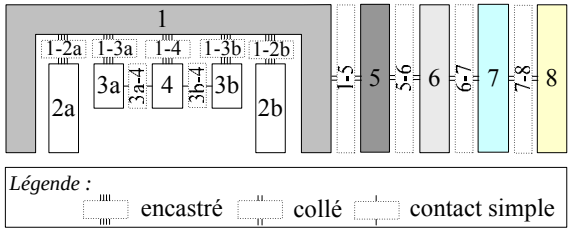
I.1.2.1. Analyse structurelle du mur en béton

La démarche de réalisation des analyses structurelle et fonctionnelle du mur en béton est identique à celle de la fenêtre. L'application choisie est décrite structurellement à la figure 62 ; ce mur est composé de deux groupes de composants :

- **groupe 1** : la structure, les armatures minimales de peau et les armatures du linteau, assurant la stabilité du mur,
- **groupe 2** : le complexe isolant (plot de colle, doublage, isolant, revêtement) assurant l'isolation acoustique et thermique du mur ; les plots de colle formant une lame d'air entre la structure et le doublage.



Graphe structurel éclaté en 3D



Graphe topologique

N°	Matériau	Géométrie	Dimensions
1	Béton	Volumique	B25, ép. 20 cm
2a-b	Acier	Surfacique	Treillis ∅ 8, m.c. 20 cm, *e* = 2,5 cm
3a-b	Acier	Linéique	HA12, *e* = 4 cm
4	Acier	Linéique	∅ 6
5	Ciment, sable, résine époxy	Volumique	ép. 2 cm
6	Plâtre	Volumique	BA13
7	Polystyrène	Volumique	ép. 5 cm
8	Acrylique	Surfacique	ép. 2 mm

Caractéristiques des composants

Figure 62 : Structure du mur en béton étudié

L'environnement du mur se décompose en un milieu extérieur du côté de la structure (*composant* 1) et un milieu intérieur du côté du revêtement (*composant* 8). Nous considérons que l'intensité des agents environnementaux est normale à l'exception des chocs durs dont l'intensité est « importante » ; ces chocs durs correspondent aux conditions d'usage (coup de pied, choc de mobilier, ...).

I.1.2.2. Analyse fonctionnelle du mur en béton

L'ensemble des fonctions assurées par le produit, ses composants et ses interfaces sont regroupées en cinq fonctions génériques et décrites au tableau 45. Les fonctions « élémentaires » comprises dans un même groupe de fonctions traduisent le même comportement des composants assurant ces fonctions élémentaires vis-à-vis des flux d'agents environnementaux associés ; par exemple les fonctions « être étanche aux liquides » et « être opaque (U.V., éclairage artificiel) » assurées par les composants 1 (structure) et 8 (revêtement) sont dans le même groupe de fonction « stopper ».

Fonction	Réf.	Composant	Interface
Stopper : être étanche (liquides, vapeurs, gaz, animaux / bactéries, végétaux / champignons, précipitations), être isolant, être opaque (U.V., éclairage artificiel).	Fp_1	1, 8	
Absorber le rayonnement I.R., les températures et le bruit.	Fp_2	1, 5, 6, 7	
Résister mécaniquement : résister aux efforts de compression, traction, cisaillement, flexion, résister aux pressions, aux vibrations à la fatigue, aux frottements, aux chocs durs et mous, maintenir en position (stabilité), encastrer et coller.	Fp_3	Tous	Toutes sauf les « contact simple »
Etre intègre : résister aux contacts des liquides, des vapeurs, des gaz, de l'électricité, des radiations, des températures, des animaux / bactéries, des végétaux / champignons, des précipitations.	Fs_4	Tous	Toutes
Etre conforme aux réglementations et exigences.	Fp_5	Tous	Toutes

Tableau 45 : Fonctions du mur en béton et des composants / interfaces associé(e)s

Remarque : la fonction « absorber le rayonnement I.R., les températures et le bruit » correspond à la capacité des composants à assurer les conforts thermique et acoustique exigés.

I.1.2.3. Analyse du processus et AMDE du mur en béton

L'analyse du processus et les phases de réalisation de l'AMDE de ce mur sont identiques à celles de la fenêtre à la différence que les phénomènes (modes, causes et conséquences) ne sont plus obtenus par consultation d'expert mais par sélection dans la base de données des phénomènes ; cette démarche de sélection est décrite au II.3.4-b de la partie B.

Les scénarii obtenus à l'issue de l'AMDE peuvent se regrouper en trois scénarii génériques qui sont les suivants :

- **scénario générique 1** : enchaînement de phénomènes conduisant à la dégradation des surfaces externe et interne du mur (*composants* 1 et 8),
- **scénario générique 2** : enchaînement de phénomènes conduisant à la dégradation du complexe isolant (*composants* 5, 6 et 7),
- **scénario générique 3** : enchaînement de phénomènes entraînant une décohésion mécanique des composants (1, 2a, 2b, 3a, 3b et 4) assurant la stabilité du mur.

La figure 63 représente la sélection des scénarii, se rapportant aux trois scénarii génériques décrits ci-dessus, qui nous semble a priori les plus critiques vis-à-vis de notre connaissance du comportement mécanique et du comportement physique de ce mur en béton.

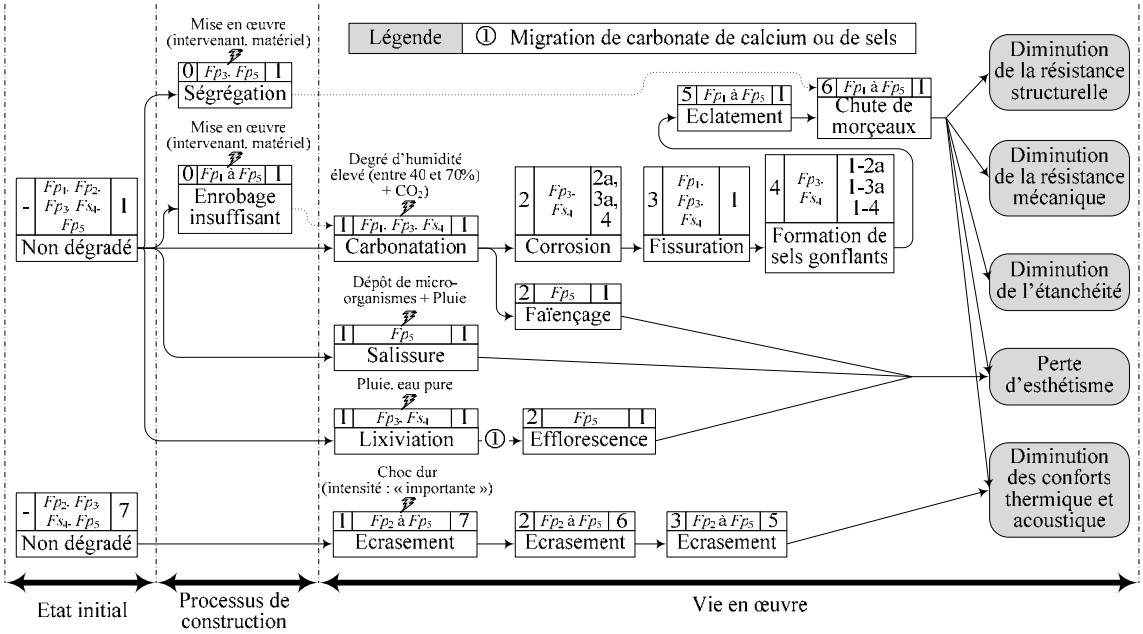


Figure 63 : Sélection de scénarii de dégradation du mur en béton

I.1.3. Analyse qualitative d'un mur en briques

Objectif de ce paragraphe

Il s'agit d'une part de présenter la structure, le fonctionnement et les scénarii de dégradation du mur en briques que nous utiliserons pour l'application des analyses quantitatives (de la criticité, des performances) et d'autre part de comparer nos deux approches (CSTB / LGC et BEST) de l'analyse fonctionnelle d'un produit de construction.

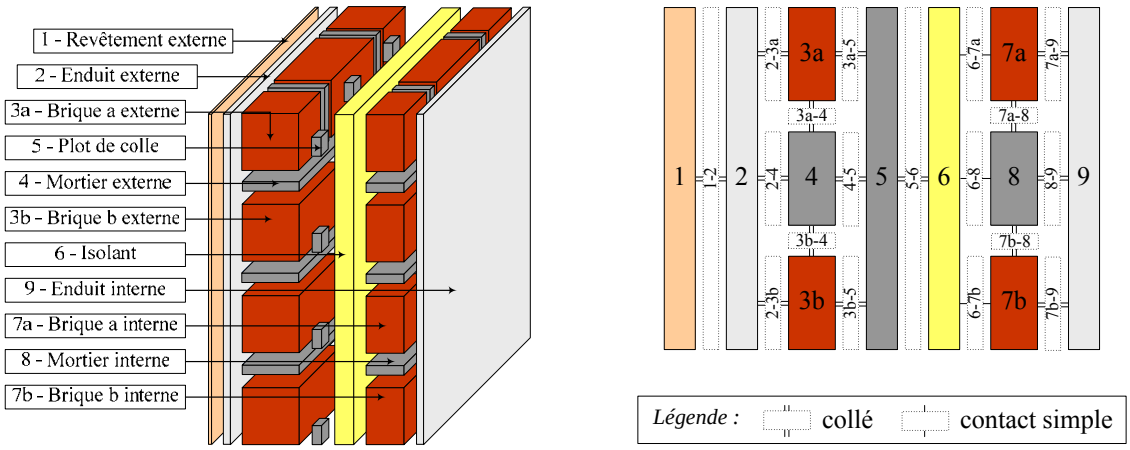
Hypothèses pour le système étudié

H1 : le produit étudié est un mur en briques non porteur (l'ossature porteuse en béton n'est pas étudiée ici) avec une couche isolante et des revêtements externe et interne dans un environnement urbain « classique » de la métropole italienne.

Nous considérons ici les hypothèses H2 et H3 formulées pour l'application de la fenêtre fixe.

I.1.3.1. Analyse structurelle et fonctionnelle du mur en briques

Le mur en briques, décrit structurellement à la figure 64, correspond à un mur traditionnel italien ; il s'agit d'un mur non porteur servant de « remplissage » intégré dans une ossature porteuse poteau-poutre en béton armé. Les deux maçonneries en briques (*composants* 3a, 4, 3b et 7a, 8, 7b) enfermant un isolant en laine de verre (*composant* 6) sont recouvertes d'un enduit (*composants* 2 et 9) et d'une peinture acrylique (*composant* 1) pour la face externe afin de protéger l'enduit externe.



Graphe structurel éclaté en 3D *Graphe topologique*

Figure 64 : Structure du mur en briques

Les caractéristiques des composants de ce mur en briques sont précisées dans le tableau 46.

N°	Matériau	Géométrie	Dimensions
1	Peinture acrylique	Surfacique	ép. 0,2 cm
2	Chaux, ciment, sable	Volumique	ép. 1,3 cm
3a-b	Terre cuite	Volumique	Semi-pleines, 12 × 12 × 25 cm
4	Mortier	Volumique	ép. 2 cm
5	Ciment, sable, résine époxy	Volumique	ép. 2 cm
6	Laine de verre	Volumique	ép. 4 cm
7a-b	Terre cuite	Volumique	Creuses, 8 × 12 × 25 cm
8	Mortier	Volumique	ép. 2 cm
9	Chaux, ciment, sable	Volumique	ép. 1,5 cm

Tableau 46 : Caractéristiques des composants du mur en briques

L'environnement de ce mur en briques est décomposé en deux milieux, un milieu externe du côté du revêtement externe et un milieu interne du côté de l'enduit interne. L'intensité des « chocs durs » est ici considérée comme « très importante ».

Les fonctions « élémentaires » de ce mur, de ses composants et de ses interfaces sont regroupées en cinq fonctions génériques qui sont décrites au tableau 47.

Fonction	Réf.	Composant	Interface
Stopper : être étanche (liquides, vapeurs, gaz, animaux / bactéries, végétaux / champignons, précipitations), être isolant, être opaque (U.V., éclairage artificiel).	Fp_1	1, 9	
Absorber le rayonnement I.R., les températures et les bruits.	Fp_2	3a, 3b, 4, 6, 7a, 7b, 8	
Résister mécaniquement : résister aux efforts de compression, traction, cisaillement, flexion, résister aux pressions, aux vibrations à la fatigue, aux frottements, aux chocs durs et mous, maintenir en position (stabilité) et coller.	Fp_3	Tous	Toutes sauf les « contact simple »
Etre intègre : résister aux contacts des liquides, des vapeurs, des gaz, de l'électricité, des radiations, des températures, des animaux / bactéries, des végétaux / champignons, des précipitations.	Fs_4	Tous	Toutes
Etre conforme aux réglementations et exigences.	Fp_5	Tous	Toutes

Tableau 47 : Fonctions du mur en briques et des composants / interfaces associé(e)s

Le mur en briques et le mur en béton assurent donc les mêmes fonctions (*cf.* tableaux 45 et 47), ce sont les matériaux utilisés et leur agencement qui diffèrent. Par exemple, la laine de verre assurant l'isolation du mur en briques est placée entre les deux couches en briques alors que le complexe plaque de plâtre et polystyrène assurant l'isolation du mur en béton est placé sur le béton. Ceci justifie l'opportunité de comparaison des résultats des analyses quantitatives (de la criticité et des performances) de deux produits assurant les mêmes fonctions.

I.1.3.2. Comparaison de nos analyses fonctionnelles – CSTB / LGC et BEST

Cette application nous a également permis de comparer nos deux approches (avec le BEST du Politecnico di Milano) d'analyse fonctionnelle, en vue d'une intégration de l'AMDE dans leur Performance Limits Method (*cf.* II.4.3 de la partie A).

L'analyse fonctionnelle du BEST consiste à affecter des fonctions aux composants du mur par rapport à leurs propriétés physiques ; par exemple, un composant a une *résistance élevée au flux de chaleur* si sa résistance thermique r est supérieure ou égale à 0,5 fois la résistance thermique R du produit et ce composant a une *résistance normale au flux de chaleur* si $0{,}1\ R < r < 0{,}5\ R$. Il s'agit ensuite de représenter la répartition de ces fonctions sur un schéma structurel (semblable au graphe topologique sans les interfaces). L'intérêt de cette représentation est de pouvoir visualiser la propension de participation des composants aux fonctions du mur.

Rappel : les fonctions des principaux produits de construction structuraux (mur, plancher, etc.) et les propriétés physiques associées ont été définies sous formes de grilles par le BEST. Leurs études sont centrées sur les fonctions relatives aux conforts thermique, acoustique et hydrique de ces produits.

L'avantage de l'analyse fonctionnelle du BEST est d'avoir une modélisation non binaire – contrairement à la notre où une fonction est ou n'est pas assurée – qui est donc plus réaliste.
L'inconvénient de cette analyse fonctionnelle est de multiplier le nombre de fonctions à prendre en compte lors de l'AMDE, ce qui revient à alourdir cette analyse en augmentant le nombre de lignes du tableau AMDE.

Etant donné que les conséquences d'un phénomène sur une fonction peuvent actuellement être soit « pas de conséquence », soit « diminution de la fonction », soit « défaillance de la fonction » et que mieux connaître le fonctionnement d'une structure n'implique pas de mieux connaître l'ampleur de l'impact d'un phénomène sur ces fonctions, les conséquences d'un phénomène sur deux fonctions décrites plus finement seront probablement identiques.

I.1.3.3. AMDE du mur en briques

L'AMDE de ce mur a été réalisée en utilisant les connaissances phénoménologiques des experts du BEST et du CSTB, c'est-à-dire en suivant la même démarche que pour la fenêtre.
Les scénarii élémentaires de ce mur peuvent se regrouper en trois scénarii génériques :

- **scénario générique 1** : enchaînement de phénomènes conduisant à la dégradation des surfaces externe et interne du mur (*composants* 1 et 9),
- **scénario générique 2** : enchaînement de phénomènes conduisant à la dégradation de l'isolant (*composant* 6),
- **scénario générique 3** : enchaînement de phénomènes entraînant un effondrement des maçonneries en briques (*composants* 3a, 3b, 4, 7a, 7b et 8).

Une sélection des scénarii qui nous semble mécaniquement, physiquement et a priori les plus critiques est présentée à la figure 65.

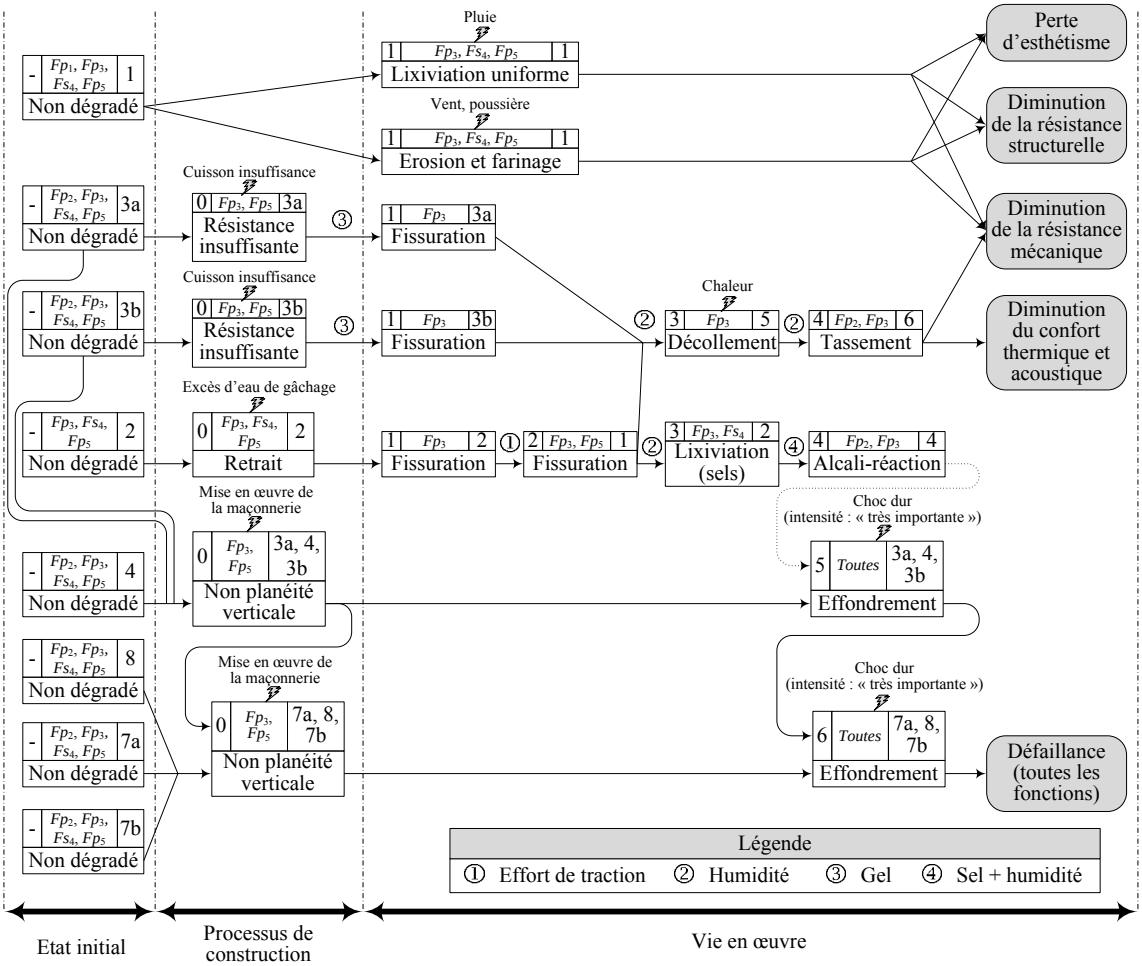


Figure 65 : Sélection de scénarii de dégradation du mur en briques

I.1.4. Analyse qualitative d'un complexe mur en béton et fenêtre

Objectif de ce paragraphe

Il s'agit de montrer la démarche d'obtention des scénarii de dégradation d'un assemblage de produits (échelle géométrique intermédiaire entre le produit de construction et le bâtiment) à partir des scénarii de ses produits constitutifs.

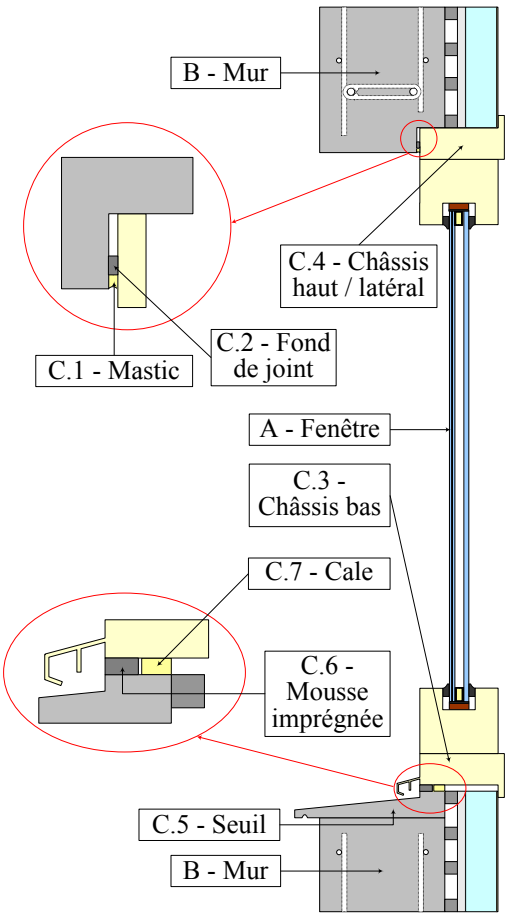
Hypothèses pour le système étudié

H1 : les produits de ce complexe sont ceux présentés dans les paragraphes I.1.1 et I.1.2 ; ce complexe est considéré dans le même environnement que ses produits c'est-à-dire un environnement urbain « classique » de la métropole française.

Nous considérons ici les hypothèses H2 et H3 formulées pour l'application de la fenêtre fixe.

I.1.4.1. Analyse structurelle et fonctionnelle du complexe mur béton et fenêtre fixe

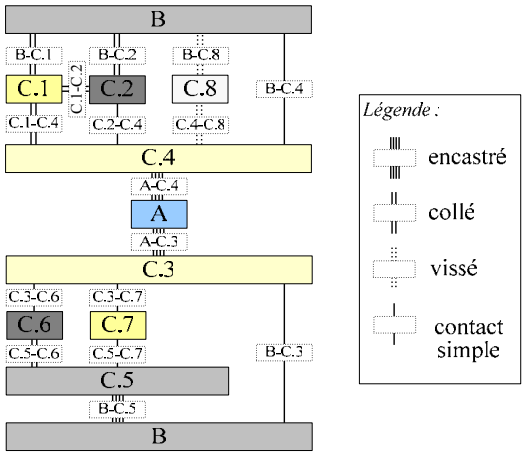
Le complexe mur en béton et fenêtre, décrit à la figure 66, correspond à l'intégration de la fenêtre fixe (*composant* A) dans le mur en béton (*composant* B) ; cet assemblage implique l'ajout de composants de liaison entre ces deux produits (*composants* C.1 à C.8) et génère de nouvelles interfaces.



N°	Matériau	Géométrie	Dimensions
A	*cf.* I.1.1		
B	*cf.* I.1.2		
C.1	Silicone	Linéique	10 × 5 mm
C.2	Polyuréthanne	Linéique	10 × 10 mm
C.3	PVC	Volumique	12,5 × 5 cm (hors rejet d'eau et recouvrement)
C.4	PVC	Volumique	12,5 × 5 cm (hors recouvrement)
C.5	Béton	Volumique	B 25, pente 10 %
C.6	Polyuréthanne et résine acrylique	Linéique	10 × 20 mm
C.7	PVC	Linéique	10 × 20 mm
C.8	Acier galvanisé	Surfacique	20 × 200 mm

Remarque : le composant C.8 correspond aux pattes de fixation reliant le châssis latéral au jambage du mur.

Caractéristiques des composants



Graphe structurel *Graphe topologique*

Figure 66 : Structure du complexe mur en béton et fenêtre

Les fonctions de ce complexe sont décrites dans le tableau 48 ; elles correspondent à l'ensemble des fonctions du mur et de la fenêtre auxquelles est ajoutée l'*évacuation des liquides et des précipitations* qui est une fonction spécifique à certains composants de liaison entre le mur et la fenêtre (seuil et rejet d'eau du châssis bas).

Remarque : les fonctions « maintenir en position » et « adhérer » qui apparaissent distinctement dans l'analyse qualitative de la fenêtre sont ici regroupées dans la fonction « résister mécaniquement », puisqu'il ne s'agit plus d'être aussi précis sur la description des scénarii relatifs à la fenêtre.

Fonction	Réf.	Composant	Interface
Etre transparent.	Fp_1	A	
Stopper : être étanche (liquides, vapeurs, gaz, animaux / bactéries, végétaux / champignons, précipitations), être isolant, être opaque (U.V., éclairage artificiel).	Fp_2	B, C.1, C.3, C.4, C.5, C.6	A-C.3, A-C.4, B-C.1, B-C.3, B-C.5, C.1-C.4, C.3-C.6, C.5-C.6
Absorber le rayonnement infrarouge.	Fp_3	A, B, C.1, C.3, C.5	-
Absorber les températures et les bruits.	Fp_4	A, B, C.1, C.2, C.3, C.4, C.5, C.6	-
Evacuer les liquides et précipitations	Fp_5	C.3, C.5	-
Résister mécaniquement : résister aux efforts de compression, traction, cisaillement, flexion, résister aux pressions, aux vibrations à la fatigue, aux frottements, aux chocs durs et mous, maintenir en position (stabilité), encastrer, coller et visser.	Fp_6	Tous	Toutes sauf les « contact simple »
Etre intègre : résister aux contacts des liquides, des vapeurs, des gaz, de l'électricité, des radiations, des températures, des animaux / bactéries, des végétaux / champignons, des précipitations.	Fs_7	Tous	Toutes
Etre conforme aux réglementations et exigences.	Fp_8	tous	Toutes

Tableau 48 : Fonctions du complexe mur en béton et fenêtre et des composants / interfaces associé(e)s

I.1.4.2. AMDE du complexe mur en béton et fenêtre fixe

L'AMDE de ce complexe résulte de l'analyse des effets de six types d'actions :

- **action 1** : les effets de l'environnement sur la fenêtre, ce qui correspond à l'AMDE de la fenêtre,
- **action 2** : les effets de l'environnement sur le mur, ce qui correspond à l'AMDE du mur en béton,
- **action 3** : les effets de l'environnement sur les composants assurant la liaison entre le mur et la fenêtre (*composants* C.1 à C.8) ainsi que sur les interfaces entre ces composants et le mur et sur les interfaces entre ces composants et la fenêtre,
- **action 4** : les actions du mur sur la fenêtre transitant par les composants de liaison,
- **action 5** : les actions de la fenêtre sur le mur transitant par les composants de liaison,
- **action 6** : les actions des composants de liaison sur le mur et sur la fenêtre.

La sous-AMDE correspondant à l'action 3 est obtenue en appliquant la même démarche que celle de l'AMDE du mur ou de l'AMDE de la fenêtre.

Les actions 4 à 6 correspondent à des sollicitations mécaniques ou à des migrations de matériau des composants, ces actions sont listées dans les effets indirects des AMDE de la fenêtre, du mur et des composants de liaison. Réaliser les sous-AMDE relatives aux actions 4, 5 et 6 revient à poursuivre l'itération de l'AMDE (phase 5 décrite au I.1.1.4) en considérant tous les composants et toutes les fonctions du complexe mur et fenêtre.

L'AMDE du complexe mur-fenêtre est donc « l'union » des sous-AMDE obtenues pour chacune des six actions citées ci-dessus.

Les principaux scénarii relatifs aux actions 3 à 6, c'est-à-dire celles non étudiées précédemment, sont les suivants :

- **action 3** :
  - défaillance de l'étanchéité par infiltration d'eau par les joints (décollement, défaut de mise en œuvre), par le châssis ou par le seuil (fissurations),
  - baisse du confort thermique et / ou acoustique par décomposition et / ou durcissement des joints,
  - défaillance du maintien en position (cale inappropriée, rupture du châssis, mauvaise mise en œuvre des fixations),
- **action 4** :
  - rupture du vitrage par déformation du cadre due à sa mise en compression (déformation du linteau),
  - chute du vitrage par mise en traction du cadre (tassement du trumeau),
  - chute de la fenêtre par rupture des fixations (déformation du mur entraînant des efforts de traction dans les fixations),
- **action 5** :
  - chute du vitrage due à la rupture par fatigue des fixations engendrée par une dilatation répétée du cadre de la fenêtre,
  - infiltration d'eau par les interfaces entre la fenêtre et les composants de liaison et diminution du confort thermique et acoustique engendrées par une déformation du cadre de la fenêtre,
- **action 6** :
  - effondrement du complexe isolant du mur par infiltration d'eau dans la lame d'air (créée par les plots de colle) entraînée par une fissuration du seuil ou du châssis,
  - chute du vitrage ou infiltration d'eau engendrées par une rupture du châssis.

I.2. Applications de l'analyse quantitative temporelle

Nous présentons successivement dans ce paragraphe les analyses quantitatives temporelles de la fenêtre fixe et du mur en béton.

I.2.1. Analyse quantitative temporelle de la fenêtre

Objectif de ce paragraphe

Il s'agit d'illustrer les différentes étapes de l'analyse quantitative temporelle permettant d'obtenir la durée de vie de la fenêtre fixe décrite précédemment (*cf.* I.1.1). Les étapes illustrées ici sont :

1. la préparation de l'étude quantitative temporelle (définition des référentiels de l'étude, choix de la stratégie de traitement, transformation des données temporelles collectées, évaluation de la qualité de ces données et préparation des données temporelles pour leur traitement),
2. le traitement des données temporelles (unification et agrégation),
3. le traitement des données de probabilité d'apparition (estimation des probabilités d'apparition, agrégation et gestion des interactions entre scénarii),
4. l'obtention de la durée de vie de la fenêtre.

Hypothèses pour le système étudié

Nous considérons la même hypothèse H1 formulée lors de l'analyse qualitative de cette fenêtre.

H2 : nous prenons en compte uniquement les onze scénarii décrits lors de l'analyse qualitative (*cf.* figure 61) et considérons qu'ils sont possibles, c'est-à-dire que tous les phénomènes peuvent démarrer et se réaliser (avec une probabilité plus ou moins importante).

I.2.1.1. Préparation de l'étude quantitative temporelle

Définition des référentiels de l'étude

La définition des référentiels de l'étude (présentée au I.2.3-a de la partie B) permet d'orienter la recherche des données à collecter et sert de référence pour l'évaluation de la qualité des données (détaillée ci-après). Cette définition est directement déduite des résultats de l'analyse qualitative, c'est-à-dire de la liste des phénomènes et des scénarii.
Concrètement, on définit en général un référentiel pour l'ensemble des scénarii, des référentiels pour chaque scénario et chaque phénomène identifiés lors de l'AMDE et autant de référentiels que de groupes de phénomènes dont on sait que les données temporelles sont a priori existantes.

Le tableau 49 illustre trois des référentiels issus des scénarii de la fenêtre :

Réf.	Entité géométrique	*AG*	Entité phénoménologique	*AP*	Nature et intensité des sollicitations environnementales
*R*1	Fenêtre fixe décrite à la figure 57	*Pro*	Ensemble des scénarii décrit à la figure 61	*Sci*	*Nature* : ensemble des causes décrites à la figure 61 *Intensité* : Normale
*R*2	Joint adhérence verre en silicone	*Com*	Durcissement	*Ph*	*Nature* : Ozone + U.V. *Intensité* : Normale
*R*3	Ecarteur en aluminium	*Com*	Corrosion par piqûres + Perforation	*Ph*	*Nature* : Humidité ; Produits halogènes (chlore, fluor, brome, iode) *Intensité* : Importante
AG : axe géométrique ; AP : axe phénoménologique ; Com : composant ; Pro : produit ; Ph : phénomène ; Sci : scénarii					

Tableau 49 : Exemples de référentiels de la fenêtre fixe

Remarque : la démarche d'évaluation de l'intensité des sollicitations est présentée au I.2.1.3.

Choix de la stratégie de traitement

Nous définissons la stratégie de traitement des données de durée et de probabilité d'apparition à partir de l'arbre de choix de la stratégie de quantification temporelle présenté en annexe 9. Le chemin que nous suivons ici dans l'arbre de choix est représenté à la figure 67.

Notre objectif est d'évaluer la durée de vie de la fenêtre en prenant en compte l'ensemble des scénarii décrit à la figure 61, la localisation de notre point objectif dans l'espace des références est donc défini par le quadruplet {produit ; scénarii ; multi-fonction ; durée de vie}. Nous démarrons donc notre cheminement dans l'arbre de choix au sommet LO_1 = {*EG* = Produit ; *EP* = Scénarii}.
Nous disposons à ce niveau de plusieurs données temporelles, présentées au tableau 50, et d'aucunes données de probabilité d'apparition.

Réf.	N°	Entité géométrique	Entité phénoménologique	Donnée brute	Source
*R*1	Donnée 1	Fenêtre en PVC avec vitrage isolant	Durée de vie	50 ans	[TRI, 90]
*R*1	Donnée 2	Verre isolant	Durée de vie	En moyenne 20 ans, au minimum 15 ans	[PIB, 95]
*R*1	Donnée 3	Verre de fenêtre	Durée de vie	30 ans	[EDI, 03b]
*R*1	Donnée 4	Simple vitrage	Durée de vie	De 60 à 100 ans en moyenne 80 ans	[EDI, 03c]
*R*1	Donnée 5	Verre feuilleté isolant	Durée de vie	En moyenne 25 ans à 5 ans près	[EDI, 03c]
*R*1	Donnée 6	Fenêtre en PVC	Durée de vie	De 20 à 30 ans	[EDI, 03d]
*R*1	Donnée 7	Fenêtre en PVC	Durée de vie	De 45 à 75 ans en moyenne 50 ans	[EDI, 03e]
*R*1	Donnée 8	Fenêtre en PVC	Durée de vie	De 30 à 70 ans	[EDI, 03b]
*R*1	Donnée 9	Fenêtre en PVC	Durée de vie	De 25 à 30 ans	[EDI, 03f]
*R*1	Donnée 10	Fenêtre en PVC	Durée de vie	25 ans	[EDI, 03g]

Tableau 50 : Liste des données temporelles collectées au niveau du produit et de l'ensemble des scénarii

Nous estimons que la qualité de ces données est insuffisante dans la mesure où nous ne savons pas si elles correspondent aux scénarii que nous avons retenus ; « B1-LO_1 » prend donc comme valeur « *b* » et nous disposons de « données au LO_1 » que nous utiliserons ultérieurement.

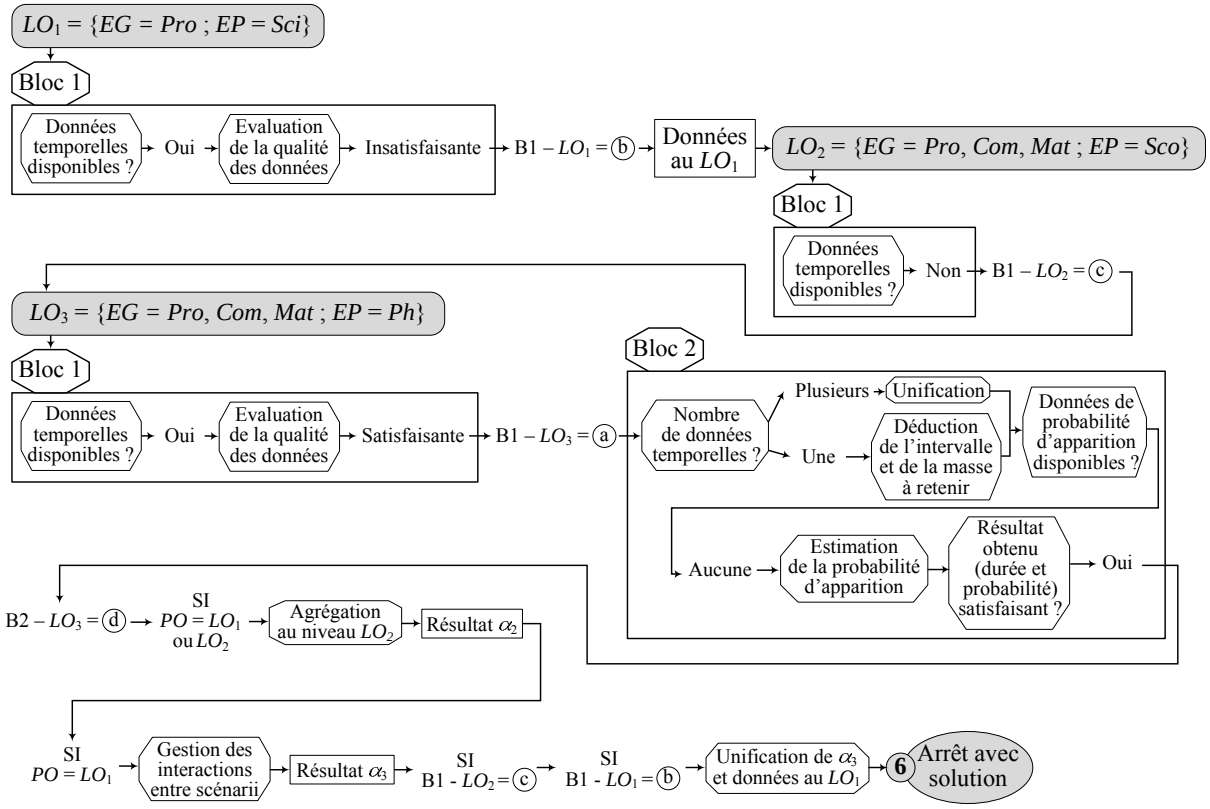


Figure 67 : Stratégie de traitement des données utilisée pour la quantification temporelle de la fenêtre

Nous nous positionnons ensuite au sommet LO_2 = {*EG* = Produit, Composant ou Matériau ; *EP* = Scénario} ; nous n'avons pas collecté de données à ce niveau, par conséquent « B1-LO_2 » est égal à « *c* », et nous nous plaçons au sommet LO_3 = {*EG* = Produit, Composant ou Matériau ; *EP* = Phénomène}. Les données temporelles que nous avons collectées à ce niveau sont présentées pour les référentiels *R*2 et *R*3 dans le tableau 51 et pour l'ensemble des référentiels de la fenêtre en annexe 13.

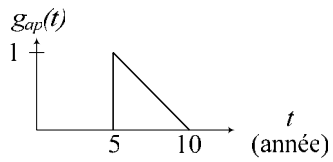
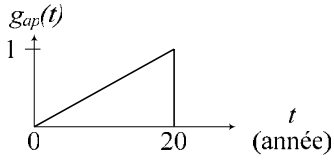
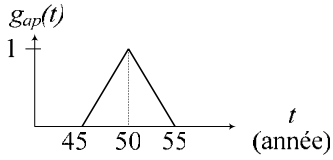
Réf.	N°	Entité géométrique	Entité phénoménologique	Donnée brute	Source
*R*2	Donnée 11	Système d'étanchéité (mastic) de fenêtre	Réfection localisée	Tous les 5 ans	[PER, 95]
*R*2	Donnée 12	Système d'étanchéité (mastic) de fenêtre	Réfection totale	Tous les 10 ans	[PER, 95]
*R*2	Donnée 13	Garniture (mastic) de fenêtre	Remplacement ponctuel	Tous les 10 ans	[PER, 95]
*R*2	Donnée 14	Garniture (mastic) de fenêtre	Remplacement intégral	Entre 15 et 20 ans	[PER, 95]
*R*2	Donnée 15	Joint de fenêtre en silicone	Durée de vie	< 20 ans	[EDI, 03a]
*R*3	Donnée 16	Aluminium	Vitesse de corrosion de l'aluminium (hypothèse : épaisseur écarteur de 0,1 mm)	De 20 à 40 ans et en moyenne 26 ans	[NAT, 06]

Tableau 51 : Liste des données temporelles collectées pour les référentiels R2 et R3

Nous avons alors « B1 – LO_3 » égal à « *a* », c'est-à-dire que nous estimons que la qualité des données temporelles est satisfaisante. Nous disposons soit de plusieurs données temporelles pour un même référentiel (cas du référentiel *R*2), soit d'une donnée unique (cas du référentiel *R*3), selon les référentiels ; nous procéderons donc (en appliquant le « bloc 2 ») soit à une unification des données multiples, soit à une déduction de l'intervalle et de la masse à retenir.
Nous ne disposons par contre pas de données de probabilité d'apparition ; en appliquant le « bloc 2 », nous procéderons alors à l'estimation de ces probabilités.
Nous appliquerons ensuite la branche conduisant à la solution ⑥ de l'arbre des choix si les résultats de l'application du « bloc 2 » sont satisfaisants (B2-LO_3 = *d*), sinon nous nous arrêterons sans résultats au niveau du phénomène (B2-LO_3 = *e*) et avec un résultat non satisfaisant au niveau des scénarii (unification des données temporelles du tableau 50).

Transformation des données temporelles collectées

Nous traduisons les données temporelles des tableaux 50 et 51 en sous-ensembles flous normalisés triangulaires (données 1 à 5, 7, 10 à 13, 15 et 16) ou en intervalles normalisés (données 6, 8, 9 et 14), selon la méthode de transformation des données (*cf.* I.1 de la partie B). Plus précisément, nous distinguons cinq cas, dont la transformation (basée sur les propositions de [LAI, 00]) est détaillée dans le tableau 52.

Cas 1 : donnée sous forme d'inégalité supérieure *Données correspondantes* : 11, 12 et 13. *Transformation* : la fonction d'appartenance vaut 1 pour la valeur de l'inégalité et 0 pour deux fois cette valeur.	*Donnée 11* 
Cas 2 : donnée sous forme d'inégalité inférieure *Donnée correspondante* : 15. *Transformation* : la fonction d'appartenance vaut 1 pour la valeur de l'inégalité et 0 pour $t = 0$.	*Donnée 15* 
Cas 3 : donnée ponctuelle *Données correspondantes* : 1, 3 et 10. *Transformation* : la fonction d'appartenance vaut 1 pour la valeur ponctuelle et 0 pour + ou - 10% de cette valeur.	*Donnée 1* 

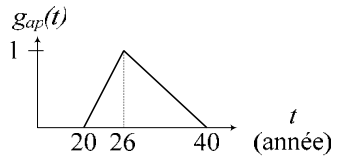
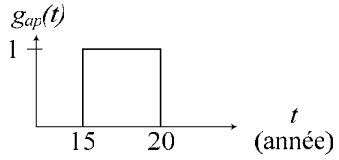
Cas 4 : donnée sous forme d'intervalle avec moyenne *Données correspondantes* : 2, 4, 5, 7 et 16. *Transformation* : la fonction d'appartenance vaut 1 pour la valeur moyenne et 0 aux bornes de l'intervalle.	*Donnée 16* 
Cas 5 : donnée sous forme d'intervalle *Données correspondantes* : 6, 8, 9 et 14. *Transformation* : la fonction d'appartenance vaut 1 pour les valeurs de l'intervalle et 0 ailleurs.	*Donnée 14* 

Tableau 52 : Transformation des données temporelles des tableaux 51 et 52

Evaluation de la qualité des données

Nous évaluons la qualité de l'ensemble des données temporelles (collectées puis transformées) à l'aide de la grille d'évaluation présentée au I.2.3-c de la partie B, afin de connaître la masse de croyance que l'on peut affecter à chacune de ces données.

Par exemple, pour la donnée 11, il s'agit d'une donnée temporelle, la pondération simplifiée des critères CE_1 à CE_{10}, CE_{14} et CE_{15} est donc égale à 1 et cette pondération est égale à 0 pour les trois autres critères spécifiques aux données de performance.
Cette donnée provient d'une étude statistique (CE_1 = 1/3), nous considérons qu'elle a de faibles hypothèses de modélisation (CE_2 = 2/3), les données de base qui ont permis d'obtenir cette donnée sont issues d'un plan d'expérience (CE_3 = 1), et la source [PER, 95] est référencée (CE_4 = 1). Cette donnée provient d'un retour d'expérience, par conséquent nous supposons que la censure n'a pas été prise en compte (CE_5 = 0) ; la représentativité de la donnée collectée sous forme d'un sous-ensemble flou nous semble correcte (CE_6 = 2/3). La correspondance entre les échelles géométrique et phénoménologique de cette donnée et celles du référentiel C1 associé (*cf.* tableau 49) est entière (CE_7 = CE_9 = 1), par contre nous supposons que la correspondance des entités géométrique et phénoménologiques est seulement correcte (CE_8 = CE_{10} = 2/3) ; c'est-à-dire que nous supposons que le mastic est en silicone et que la durée de réfection localisée est équivalente à la durée de durcissement du joint en silicone. Nous supposons que la correspondance entre les sollicitations environnementales de la donnée 11 est correcte vis-à-vis des sollicitations du référentiel (CE_{14} = 2/3) ; c'est-à-dire que nous supposons que les données de retour d'expérience ayant permis de déterminer la donnée 11 proviennent de bâtiments implantés en France métropolitaine. Le cadre de discernement ayant permis d'évaluer l'entropie de la donnée 11 est [0 ; 24] ans.

Hypothèse : la borne supérieure du cadre de discernement est prise égale à 1,2 × borne maximale des données associés au même référentiel, selon la proposition formulée par [LAI, 00].

Les masses de croyance obtenues pour les données temporelles des tableaux 51 et 52 sont présentées dans le tableau suivant, et les grilles d'évaluation associées à chacune de ces données sont détaillées en annexe 14.

Donnée	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Masse de croyance	0,62	0,59	0,56	0,62	0,65	0,49	0,58	0,62	0,58	0,56	0,65	0,64	0,67	0,63	0,61	0,75

Tableau 53 : Masses de croyance des données temporelles des tableaux 51 et 52

Remarque : la faible variation des masses de croyance, ici de 0,49 à 0,75 s'explique en partie par le fait que nous avons utilisé pour cette application des données temporelles qui sont les plus proches possibles de nos référentiels.

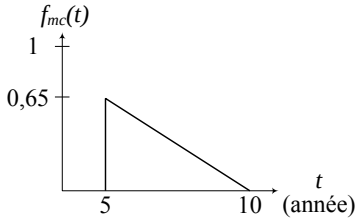
Préparation des données pour leur traitement

Nous distinguons deux procédures de préparation des données, lorsque les données relatives à un même référentiel sont multiples (cas des référentiels *R*1 et *R*2) ou lorsqu'elle est unique (cas du référentiel *R*3).

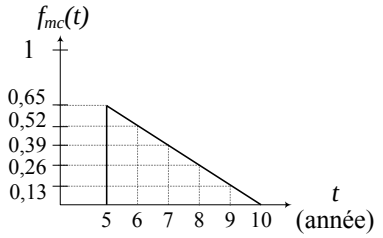
Préparation de données multiples pour un même référentiel

La préparation des données élaborées consiste en trois phases détaillées ci-après et illustrées à l'aide de la donnée 11.

Phase 1 : *Tracée de la fonction de masse de croyance.*
La fonction de masse de croyance a la forme de la fonction d'appartenance obtenue lors de la transformation de la donnée considérée et sa hauteur est égale à la masse de croyance obtenue lors de l'évaluation de la qualité de cette donnée.



Phase 2 : *Définition des α-coupes nécessaires à la fusion des données.*
Les α-coupes sont choisies de manière à ce que l'échelle d'incrémentation entre les intervalles résultants soit égale au plus petit intervalle généré par l'intersection deux à deux de l'ensemble des données disponibles pour un même référentiel. Pour *R*2 il s'agit de l'année.



Intervalles résultants :
[5 ; 6]
[5 ; 7]
[5 ; 8]
[5 ; 9]
[5 ; 10]

Phase 3 : *Calcul des masses de croyance affectées aux intervalles des α-coupes.*
Ces masses sont obtenues à l'aide de la formule suivante :

$$m_c(\alpha_i) = f_{mc}(\alpha_{i+1}) - f_{mc}(\alpha_i) \text{ et } \sum_i m_c(\alpha_i) = 1$$

$m_c([5 ; 6]) = 0,65-0,52 = 0,13$
$m_c([5 ;7]) = 0,52-0,39 = 0,13$
$m_c([5 ; 8]) = m_c([5 ; 9]) = m_c([5 ; 10]) = 0,13$

Préparation d'une donnée unique pour un référentiel fixé

La préparation d'une donnée élaborée unique pour un référentiel fixé comporte deux phases, la première est semblable à celle de la préparation de données multiples et la deuxième consiste à rechercher l'intervalle ayant une masse de croyance fixée par l'utilisateur. Cette deuxième phase est illustrée à l'aide de la donnée 16 à la figure 68.

Hypothèse : nous fixons arbitrairement ici une valeur de masse de croyance de 0,5, telle que présentée à la figure 68, puisqu'elle représente une valeur moyenne.

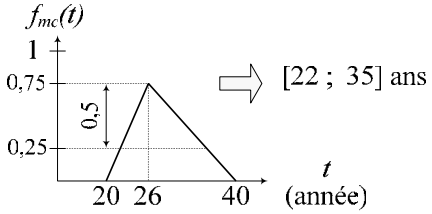


Figure 68 : Préparation de la donnée 16, donnée unique pour le référentiel R3

I.2.1.2. Traitement des données temporelles

Unification des données temporelles au niveau des phénomènes

L'unification de données temporelles multiples (deux données ou plus) pour un même référentiel est réalisée par fusion des données, telle que présentée au I.2.3-d de la partie B ; nous l'illustrons ici pour le référentiel « durcissement du joint d'adhérence verre en silicone » (*R*2) à partir des données 11 à 15 (*cf.* tableau 51). Les résultats de la préparation de ces données sont regroupés dans le tableau 54.

Donnée		Intervalle	Masse
11	*d*-1	[5 ; 6]	0,13
11	*d*-2	[5 ; 7]	0,13
11	*d*-3	[5 ; 8]	0,13
11	*d*-4	[5 ; 9]	0,13
11	*d*-5	[5 ; 10]	0,13
12	*d*-6	[10 ; 11]	0,064
12	*d*-7	[10 ; 12]	0,064
12	*d*-8	[10 ; 13]	0,064
12	*d*-9	[10 ; 14]	0,064
12	*d*-10	[10 ; 15]	0,064
12	*d*-11	[10 ; 16]	0,064
12	*d*-12	[10 ; 17]	0,064
12	*d*-13	[10 ; 18]	0,064
12	*d*-14	[10 ; 19]	0,064
12	*d*-15	[10 ; 20]	0,064
13	*d*-16	[10 ; 11]	0,067

Donnée		Intervalle	Masse
13	*d*-17	[10 ; 12]	0,067
13	*d*-18	[10 ; 13]	0,067
13	*d*-19	[10 ; 14]	0,067
13	*d*-20	[10 ; 15]	0,067
13	*d*-21	[10 ; 16]	0,067
13	*d*-22	[10 ; 17]	0,067
13	*d*-23	[10 ; 18]	0,067
13	*d*-24	[10 ; 19]	0,067
13	*d*-25	[10 ; 20]	0,067
14	*d*-26	[15 ; 20]	0,63
15	*d*-27	[19 ; 20]	0,0305
15	*d*-28	[18 ; 20]	0,0305
15	*d*-29	[17 ; 20]	0,0305
15	*d*-30	[16 ; 20]	0,0305
15	*d*-31	[15 ; 20]	0,0305
15	*d*-32	[14 ; 20]	0,0305

Donnée		Intervalle	Masse
15	*d*-33	[13 ; 20]	0,0305
15	*d*-34	[12 ; 20]	0,0305
15	*d*-35	[11 ; 20]	0,0305
15	*d*-36	[10 ; 20]	0,0305
15	*d*-37	[9 ; 20]	0,0305
15	*d*-38	[8 ; 20]	0,0305
15	*d*-39	[7 ; 20}	0,0305
15	*d*-40	[6 ; 20]	0,0305
15	*d*-41	[5 ; 20}	0,0305
15	*d*-42	[4 ; 20]	0,0305
15	*d*-43	[3 ; 20]	0,0305
15	*d*-44	[2 ; 20]	0,0305
15	*d*-45	[1 ; 20]	0,0305
15	*d*-46	[0 ; 20]	0,0305

Tableau 54 : Intervalles et masses de croyance résultant de la préparation des données 11 à 15 pour leur fusion

En appliquant la règle d'intersection de Dempster aux données résultant de la préparation (*d*-1 à *d*-46), telle qu'illustrée à la figure 69 avec les données *d*-26 et *d*-27, nous obtenons un conflit non négligeable (0,22) ; nous cherchons alors la stratégie d'assemblage la mieux adaptée à nos données à l'aide de l'algorithme de choix proposé par J. Lair (*cf.* figure 10 de la partie B).

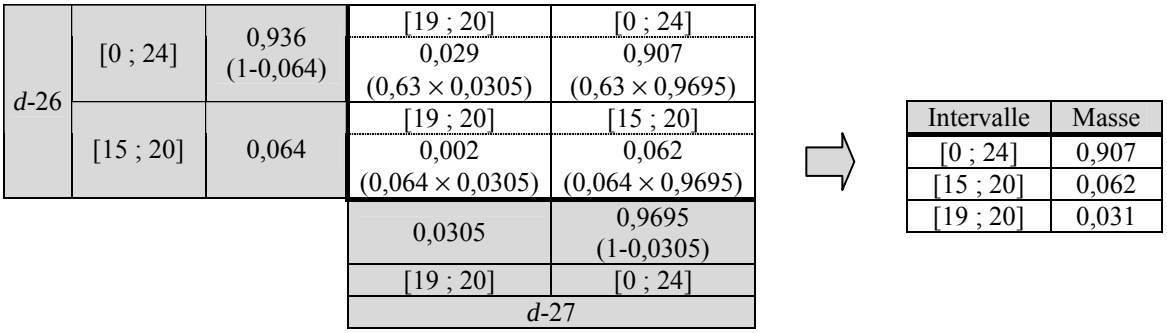


Figure 69 : Exemple de fusion des données d-26 et d-27 selon la règle d'intersection de Dempster

Nous disposons de 46 données, nous suivons donc la branche « Cardinalité > 1 », le conflit étant considéré comme « fort » nous recherchons les *ensembles maximaux cohérents de masse maximale* (EMCMM).

Il existe un EMCMM, composé des données *d*-10 à *d*-15, *d*-20 à *d*-26 et *d*-31 à *d*-36 (elles sont grisées au tableau 54), dont la masse de croyance (somme des masses des données de l'EMCMM) représente 56 % de la masse totale (somme des masses des données 1 à 5) ; la masse de l'EMCMM est donc considérée comme « forte ».

La cardinalité de l'EMCMM (égale à 19) est strictement supérieure à 1, nous cherchons alors s'il y a « faible cohérence » entre les données. Nous fixons la limite de faible cohérence à 1 an (ce qui correspond à la granularité temporelle que nous avons choisie), par conséquent les données *d*-26 et *d*-31 sont faiblement cohérentes avec les données *d*-10, *d*-11, *d*-20 et *d*-21, et la donnée *d*-32 est faiblement cohérente aux données *d*-10 et *d*-20.
La stratégie d'assemblage la mieux adaptée est donc, selon l'algorithme de choix, l'intersection de l'EMCMM avec faible cohérence ; la courbe de consensus résultant de cette fusion est présentée à la figure 70.

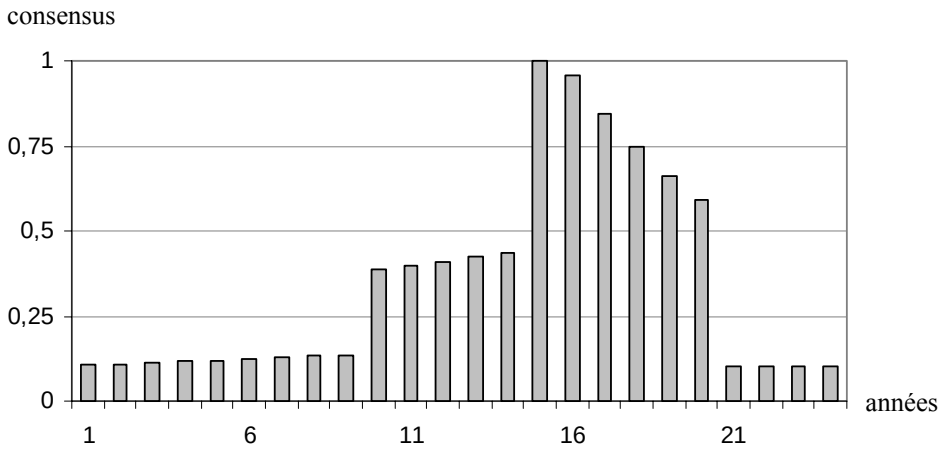


Figure 70 : Courbe de consensus de l'intersection de l'EMCMM (des données 1 à 5) avec faible cohérence

Néanmoins, la masse représentée en appliquant cette stratégie d'assemblage est relativement faible (56 %), nous recherchons alors le meilleur compromis (en ajoutant des données du tableau 54 non utilisées précédemment) entre un conflit faible (inférieur à 0,2, selon la proposition de [LAI, 00]) et une masse représentée élevée.
En rajoutant les données *d*-5 à *d*-9, *d*-16 à *d*-19 et *d*-30 à l'EMCMM considéré précédemment, nous obtenons un conflit de 0,18 et une masse représentée de 81 % ; la courbe de consensus résultant de cette fusion est présentée à la figure 71.

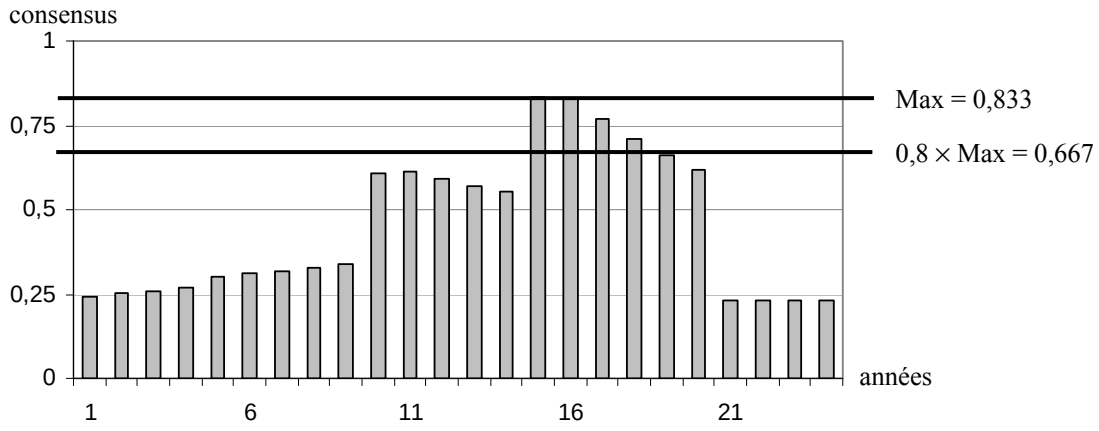


Figure 71 : Courbe de consensus de l'intersection de l'EMCMM avec faible cohérence et ajout des données d-5 à d-9, d-16 à d-19 et d-30

Nous retenons l'intervalle de temps qui regroupe 80 % du consensus, c'est-à-dire l'intervalle dont le consensus est supérieur ou égal à la valeur 0,8 × max[consensus], soit ici [15 ; 18] ans, ce qui est illustré à la figure 71.

Remarque : nous préférons retenir cet intervalle plutôt que celui qui regroupe 100 % du consensus, puisque d'une part ce résultat nous semble plus informatif qu'une donnée ponctuelle (ici, 15 ans) et que d'autre part cela permet de minimiser les risques de conflit lors de l'unification postérieure (*cf.* I.2.1.4) de cette donnée avec d'autres données.

Nous calculons ensuite les indicateurs de qualité (croyance – *Bel* – plausibilité – *Pl* – et probabilité de Smets *P*) liés à cet intervalle de temps à partir des intervalles résultants de la fusion et de leurs masses de croyance ; nous obtenons :

- *Bel*([15 ; 18]) = 0,109 : somme des masses des intervalles résultants de la fusion inclus dans [15 ; 18] ;
- *Pl*([15 ; 18]) = 0,856 : somme des masses des intervalles résultants de la fusion ayant une intersection non nulle avec [15 ; 18] (par exemple [6 ; 20] ou [10 ; 16]) ;
- *P*([15 ; 18]) = 0,399 : somme des masses des intervalles utilisées pour le calcul de la plausibilité pondérée par la longueur de l'intersection de ces intervalles avec [15 ; 18]. Par exemple, si on considère uniquement les intervalles [6 ; 20] et [10 ;16], avec m_c([6 ; 20]) = 0,009 et m_c([10 ; 16]) = 0,018, alors P([15 ;18]) = $\frac{4}{4}\times 0{,}009+\frac{2}{4}\times 0{,}018 = 0{,}018$.

La probabilité de Smets associée à l'intervalle [15 ; 18] ans est relativement faible et l'écart entre la croyance et la plausibilité est élevée (0,856 - 0,109 = 0,747), ce qui signifie que cette donnée temporelle de quantification du durcissement du joint d'adhérence verre en silicone est faiblement consensuelle.

Remarque : les conclusions qui peuvent être faites selon les résultats obtenus des durées, des masses de croyance associées et de la stratégie de quantification adoptée sont discutées au deuxième chapitre de cette partie C.

Les stratégies d'assemblage et les résultats d'unification des données temporelles obtenues pour l'ensemble des référentiels de la fenêtre sont présentés en annexe 15.

Agrégation des données temporelles du niveau du phénomène au niveau du scénario

L'agrégation de durées obtenues au niveau des phénomènes pour estimer une durée au niveau d'un scénario est réalisée par sommation des durées des phénomènes et calcul de la masse de croyance que l'on peut affecter à ce résultat, tels que présentés au I.2.3-e de la partie B ; elle est illustrée ici sur l'un des scénarii de diminution de l'absorption d'infrarouge (Sc_1) de la fenêtre décrit à la figure 72 (et en fond grisé à la figure 61) :

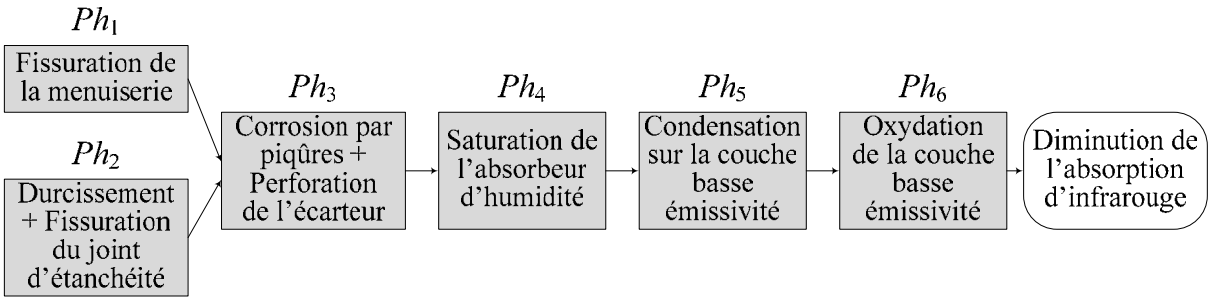


Figure 72 : Scénario Sc_1 de diminution de l'absorption d'infrarouge de la fenêtre

Les durées (obtenues par unification ou déclarées) pour les six phénomènes de la figure 72 sont présentées dans le tableau 55.

Phénomène	Mode d'obtention	Intervalle de temps	Croyance (Bel)	Plausibilité (Pl)	Probabilité de Smets (P)	Masse retenue
Ph_1	Unification	[48 ; 51] ans	0,097	0,848	0,276	0,276
Ph_2	Unification	[15 ; 18] ans	0,087	0,829	0,346	0,346
Ph_3	Préparation d'une donnée unique	[22 ; 35] ans	-	-	-	0,5
Ph_4	Déclaration	[3 ; 5] ans	-	-	-	0,25
Ph_{4bis}	Déclaration	[0 ; 2] ans	-	-	-	0,25
Ph_5	Déclaration	Instantanée	-	-	-	-
Ph_6	Déclaration	[0 ; 1] an	-	-	-	0,25

Tableau 55 : Durées obtenues ou déclarées des phénomènes du scénario de la figure 72

La *masse retenue* pour chaque phénomène correspond soit à la probabilité de Smets, lorsque la durée a été obtenue par unification (Ph_1 et Ph_2), soit à la masse de croyance fixée lors de la préparation d'une donnée unique (Ph_3), soit à une valeur déclarée arbitrairement (Ph_4 et Ph_6).

Hypothèse : nous fixons arbitrairement une valeur de masse de croyance volontairement faible (0,25) pour ne pas entraîner une surestimation de la croyance que l'on peut accorder au résultat après agrégation de données en partie déclarées.

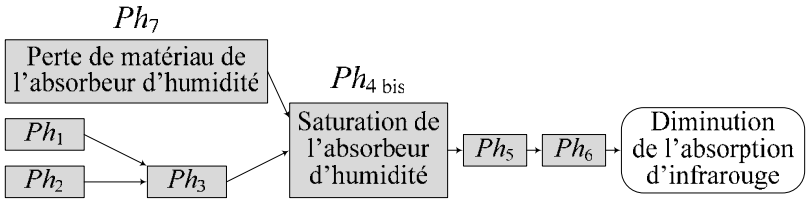
Nous considérons la durée du phénomène 5 (condensation sur la couche basse émissivité) comme « instantanée » dans la mesure où nous supposons qu'elle est inférieure à un incrément de l'échelle de temps, à savoir l'année.

Pour le scénario présenté ci-avant, la corrosion par piqûres et la perforation de l'écarteur (Ph_3) ne peuvent démarrer que s'il y a fissuration de la menuiserie (Ph_1) – qui permet l'infiltration d'humidité ou de produits halogènes à l'intérieur de la menuiserie – et durcissement puis fissuration du joint d'étanchéité (Ph_2) – qui permet la mise en contact de l'écarteur avec l'humidité. La durée du groupe de phénomènes Ph_1, Ph_2 et Ph_3 est donc égale à la durée la plus longue entre Ph_1 et Ph_2, ajoutée à la durée de Ph_3, c'est-à-dire [70 ; 86] ans ([48+22 ; 51+35]).
La durée du scénario est finalement égale à la somme de la durée du groupe de phénomènes Ph_1, Ph_2 et Ph_3 et des durées des phénomènes Ph_4 à Ph_6, c'est-à-dire : [73 ; 92] ans ([70+3+0 ; 86+5+1]).

Selon la règle d'addition de sous-ensembles flous [BOU, 95], la masse de croyance affectée à la durée du scénario est égale au minimum des masses de croyance (« masse retenue » du tableau 55) de chacun des six phénomènes, c'est-à-dire 0,25 pour ce scénario Sc_1.

Les durées et les masses de croyance des dix autres scénarii de la fenêtre, obtenues par agrégation des durées de leurs phénomènes constitutifs, sont regroupées dans le tableau 56. Comme spécifié précédemment, les durées des phénomènes, leur mode d'obtention et les indicateurs associés, qui ont permis d'évaluer ces durées de scénarii sont présentées en annexe 15. Ces durées de scénarii nous seront utiles pour l'obtention de la durée de vie de la fenêtre, *cf.* I.2.1.4.

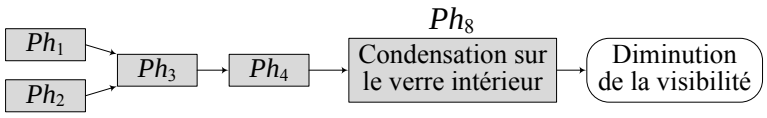
Scénario Sc_2 de diminution de l'absorption d'infrarouge :



Durée : [70 ; 90] ans

Masse de croyance : 0,25

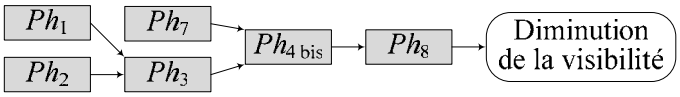
Scénario Sc_3 de diminution de la visibilité :



Durée : [73 ; 91] ans

Masse de croyance : 0,25

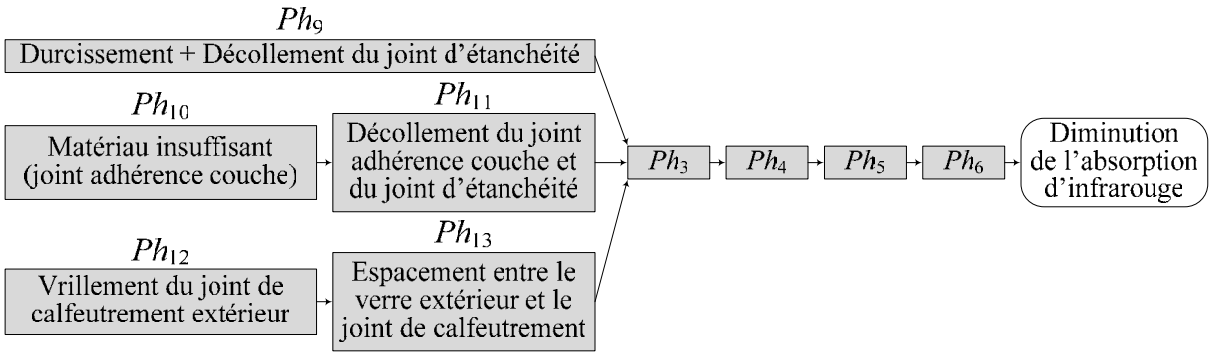
Scénario Sc_4 de diminution de la visibilité :



Durée : [70 ; 89] ans

Masse de croyance : 0,25

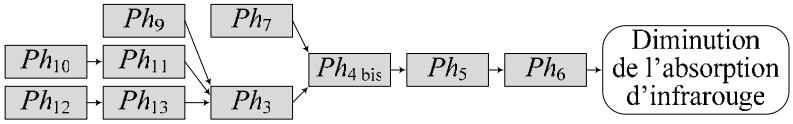
Scénario Sc_5 de diminution de l'absorption d'infrarouge :



Durée : [40 ;59] ans

Masse de croyance : 0,25

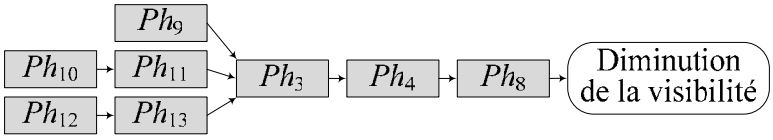
Scénario Sc_6 de diminution de l'absorption d'infrarouge :



Durée : [37 ; 57] ans

Masse de croyance : 0,25

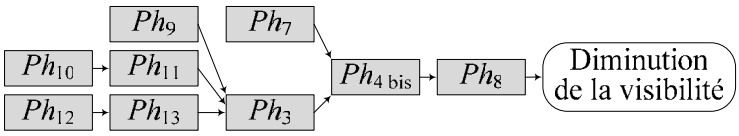
Scénario Sc_7 de diminution de la visibilité :



Durée : [40 ; 58] ans

Masse de croyance : 0,25

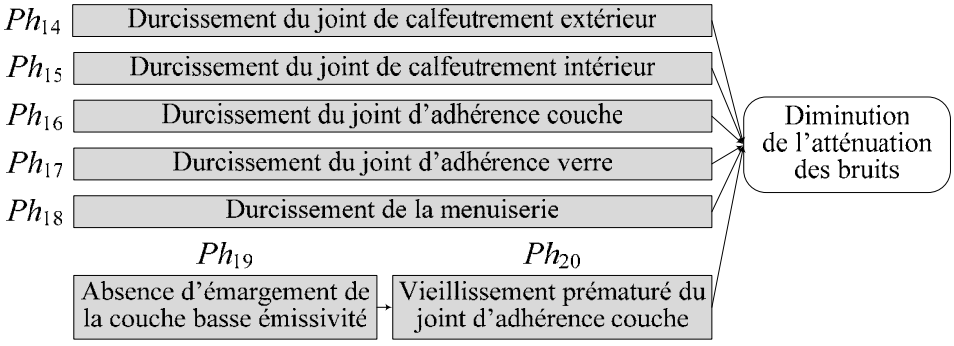
Scénario Sc_8 de diminution de la visibilité :



Durée : [37 ; 56] ans

Masse de croyance : 0,25

Scénario Sc_9 de diminution de l'atténuation des bruits :



Durée : [23 ; 35] ans

Masse de croyance : 0,395

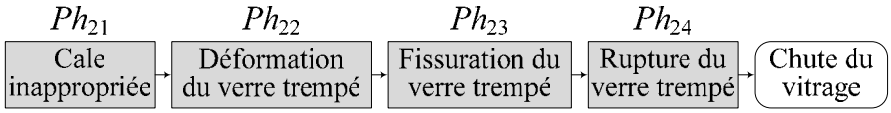
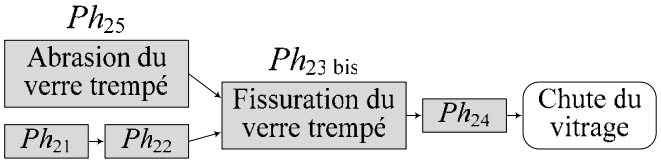
Scénario Sc_{10} de chute du vitrage : 	
Durée : Non déterminée (manque de données)	Masse de croyance : Non déterminée
Scénario Sc_{11} de chute du vitrage : 	
Durée : Non déterminée (manque de données)	Masse de croyance : Non déterminée

Tableau 56 : Durées et masses de croyance des scénarii de la fenêtre

Dans la mesure où nous n'avons pas de données temporelles permettant d'évaluer les durées des scénarii Sc_{10} et Sc_{11}, nous ne prenons plus en compte ces scénarii pour l'évaluation de la durée de la fenêtre. Les conclusions résultant de ce manque de données seront plus amplement discutées au chapitre II de cette partie C.

I.2.1.3. Traitement des données de probabilité d'apparition

Estimation de la probabilité d'apparition des phénomènes

Nous estimons la probabilité d'apparition des phénomènes Ph_i de la fenêtre (puisque nous ne disposons pas de données de probabilité d'apparition) à l'aide de deux indicateurs (démarrage $I\xi_i^D$ et cinétique $I\xi_i^C$), tel que présenté au I.3.2-c de la partie B.

Remarque : nous n'estimons pas les probabilités d'apparition des phénomènes Ph_{21} à Ph_{25} correspondant aux scénarii Sc_{10} et Sc_{11}, puisque nous ne prenons plus en compte ces scénarii, comme précisé au paragraphe précédent.

Détermination de l'indicateur de démarrage - $I\xi_i^D$:

L'indicateur de démarrage est déduit de l'estimation des indicateurs d'environnement $I\xi_i^{D1}$ et de qualité de conception $I\xi_i^{D2}$; estimation présentée ci-après.

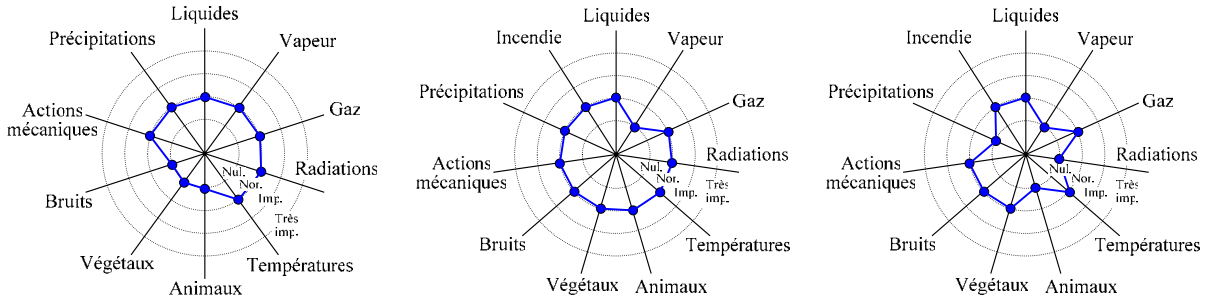
Détermination de l'indicateur d'environnement - $I\xi_i^{D1}$

L'estimation de l'indicateur d'environnement requiert la détermination de l'intensité des sollicitations, décrite ci-après, et de la nature du contact (direct ou indirect) entre composants et milieux, définie lors de l'analyse qualitative (*cf.* tableau 43).

L'intensité des agents environnementaux dépend de la concentration de ces agents dans l'environnement / le milieu considéré et des matériaux susceptibles d'être affectés par ces agents. Nous avons fait l'hypothèse que la concentration des agents environnementaux était ici normale, par conséquent l'intensité des agents environnementaux peut varier de « nulle » à « normale ».

En suivant la démarche d'estimation de l'intensité des agents environnementaux, détaillée au II.1 de la partie B, nous obtenons les résultats présentés sous forme de représentations radar à la figure 73, correspondant d'une part à son environnement en phase de processus de construction et d'autre part à ses milieux au début de sa phase de vie en œuvre (sans prendre en compte les dégradations engendrées lors du processus de construction).

Nous illustrons cette démarche d'estimation sur la catégorie environnementale des actions mécaniques du milieu extérieur au début de la vie en œuvre de la fenêtre. Il s'agit de déterminer pour chaque couple {composant ; agent environnemental} l'intensité de l'agent considéré.
Les « actions mécaniques » regroupent les charges ponctuelles statiques, les pressions, les vibrations, le vent, les frottements, les chocs durs et mous. L'analyse qualitative a mis en évidence (*cf.* figure 61) que les chocs durs peuvent entraîner la fissuration de la menuiserie (combinés à une température > 10°C), les frottements peuvent engendrés l'abrasion du verre trempé (lors de son entretien avec des produits abrasifs) … par conséquent nous avons une intensité « normale » de l'agent « choc mécanique » pour le couple {menuiserie ; choc dur} et une intensité « normale » de l'agent « frottement » pour le couple {verre trempé ; frottement}, etc.



Environnement lors du processus de construction — *Milieu extérieur au début de la vie en œuvre* — *Milieu intérieur au début de la vie en œuvre*

Figure 73 : Représentations radar des intensités des catégories environnementales de la fenêtre

A la figure 73, les valeurs des intensités sont regroupées par catégories environnementales, ce regroupement s'effectue en appliquant la formule suivante :

$$IEC_k = \max_{i,j}\left(\left\{Com_j \; ; IEA_i\right\}\right) \quad [38]$$

avec :

IEC_k : intensité de la catégorie environnementale k ;
IEA_i : intensité de l'agent environnemental i, inclus dans la catégorie environnementale k ;
Com_j : composant j, sollicité par l'agent environnemental i.

Par exemple, pour la classe environnementale « action mécanique », nous avons le couple {menuiserie ; choc dur} dont l'intensité prend la valeur « normale » (qui est la valeur maximale qu'elle peut prendre, comme précisé ci-dessus), par conséquent l'intensité de cette classe environnementale sera maximale, c'est-à-dire égale à « normale ».

Les résultats d'indicateur d'environnement obtenus pour les phénomènes (dont les références sont indiquées à la figure 72 et au tableau 56) de la fenêtre sont présentés dans le tableau suivant :

Phénomènes	Indicateur d'environnement - $I\xi_i^{D1}$
Ph_{16}, Ph_{17}	Faible
Ph_1, Ph_2, Ph_7, Ph_9, Ph_{10}, Ph_{12}, Ph_{14}, Ph_{15}, Ph_{18}, Ph_{19}	Moyen
Ph_3, Ph_4, Ph_5, Ph_6, Ph_8, Ph_{11}, Ph_{13}, Ph_{20}	Important
$Ph_{4\ bis}$	Très important

Tableau 57 : Indicateur d'environnement de la fenêtre

Détermination de l'indicateur de qualité de conception - $I\xi_i^{D2}$

L'indicateur de qualité de conception d'un phénomène Ph_i est estimé qualitativement à l'aide de la formule suivante :

$$I\xi_i^{D2} = \min\left(\left\{I\xi_i^{D2-1}\ ;\ I\xi_i^{D2-2}\ ;\ I\xi_i^{D2-3}\ ;\ I\xi_i^{D2-4}\right\}\right) \quad \textbf{[39]}$$

avec :

$I\xi_i^{D2-1}$: sous-critère de complexité structurelle du composant associé au Ph_i,

$I\xi_i^{D2-2}$: sous-critère de complexité fonctionnelle du composant associé au Ph_i,

$I\xi_i^{D2-3}$: sous-critère de phase de réalisation du composant lié au Ph_i,

$I\xi_i^{D2-4}$: sous-critère de cohérence du composant vis-à-vis du lieu d'implantation du produit.

Les résultats des quatre sous-critères obtenus pour les phénomènes de la fenêtre, ainsi que la valeur d'indicateur de qualité de conception résultante, sont présentés dans le tableau 58.

Pour tous les phénomènes, le sous-critère de phase de réalisation ($I\xi_i^{D2-3}$) est égal à « A » – réalisé en usine – puisque l'assemblage complet de la fenêtre est réalisé en usine, et nous considérons que les composants sont en « complète » cohérence avec le lieu d'implantation de la fenêtre, c'est-à-dire $I\xi_i^{D2-4}$ = « A ».

Ph_i	$I\xi_i^{D2-1}$	$I\xi_i^{D2-2}$	$I\xi_i^{D2-3}$	$I\xi_i^{D2-4}$	$I\xi_i^{D2}$
Ph_1	C	C	A	A	C
Ph_2	C	C	A	A	C
Ph_3	C	C	A	A	C
Ph_4	C	C	A	A	C
$Ph_{4\ bis}$	C	C	A	A	C
Ph_5	C	B	A	A	C
Ph_6	C	B	A	A	C
Ph_7	C	C	A	A	C
Ph_8	B	C	A	A	C
Ph_9	B	B	A	A	B
Ph_{10}	C	C	A	A	C

Ph_i	$I\xi_i^{D2-1}$	$I\xi_i^{D2-2}$	$I\xi_i^{D2-3}$	$I\xi_i^{D2-4}$	$I\xi_i^{D2}$
Ph_{11}	C	C	A	A	C
Ph_{12}	C	B	A	A	C
Ph_{13}	B	B	A	A	B
Ph_{14}	C	B	A	A	C
Ph_{15}	C	B	A	A	C
Ph_{16}	C	C	A	A	C
Ph_{17}	C	C	A	A	C
Ph_{18}	C	C	A	A	C
Ph_{19}	C	B	A	A	C
Ph_{20}	C	C	A	A	C

Tableau 58 : Indicateur de qualité de conception de la fenêtre

Prenons l'exemple du phénomène de fissuration de la menuiserie (Ph_1), nous considérons que la complexité structurelle de la menuiserie est « importante » ($I\xi_1^{D2-1}$ = C) puisqu'elle correspond à l'assemblage de plusieurs éléments en PVC moulés conçu de manière à être suffisamment résistant et à minimiser la quantité de matériau lors de sa fabrication ; et que la complexité fonctionnelle est également « importante » ($I\xi_i^{D2-2}$ = C) puisque la menuiserie assure quatre des six fonctions principales de la fenêtre et deux des quatre fonctions secondaires. L'indicateur de qualité de conception lié à ce phénomène est alors égal à la valeur minimale de {C ; C ; A ; A}, c'est-à-dire « C ».

Déduction de l'indicateur de démarrage – $I\xi_i^{D}$

L'indicateur de démarrage d'un phénomène est directement déduit des indicateurs d'environnement – $I\xi_i^{D2}$ – et de qualité de conception – $I\xi_i^{D2}$ – à l'aide du tableau 24 proposé en partie B ; les résultats obtenus pour les phénomènes de la fenêtre sont présentés dans le tableau 59.

Phénomènes	Indicateur de démarrage - $I\xi_i^D$
Ph_9, Ph_{16}, Ph_{17}	B
Ph_1, Ph_2, Ph_7, Ph_{10}, Ph_{12}, Ph_{13}, Ph_{14}, Ph_{15}, Ph_{18}, Ph_{19}	C
Ph_3, Ph_4, $Ph_{4\ bis}$, Ph_5, Ph_6, Ph_8, Ph_{11}, Ph_{20}	D

Tableau 59 : Indicateur de démarrage de la fenêtre

Détermination de l'indicateur de cinétique – $I\xi_i^C$

L'indicateur de cinétique d'un phénomène est déterminé par comparaison de sa durée à la durée du scénario le plus long le contenant. D'après les durées des scénarii obtenues par agrégation des données temporelles, présentées ci-avant, la durée la plus longue est de 92 ans (scénario Sc_1) ; et d'après les données collectées au niveau du produit, la durée la plus longue est de 100 ans (donnée 4 du tableau 50), par conséquent nous prenons la durée du scénario le plus long égale à 100 ans (t_f - t_0 = 100). La table d'estimation de l'indicateur de cinétique (détaillée au tableau 25 de la partie B) pour la fenêtre prend les valeurs présentées dans le tableau suivant :

Valeur de la classe	$I\xi_i^C$
[0 ; 5,5]	Très rapide
[4,5 ; 15,5]	Rapide
[14,5 ; 35,5]	Moyenne
[34,5 ; 60,5]	Lente
[59,5 ; 100]	Très lente

Tableau 60 : Table d'estimation de l'indicateur de cinétique de la fenêtre

Les valeurs des indicateurs de cinétique des phénomènes de la fenêtre pour lesquels nous avons obtenu une durée sont déterminées directement par lecture de la table d'estimation ci-dessus (*cf.* tableau 60) et sont présentées dans le tableau suivant :

Phénomène	Durée	Indicateur de cinétique - $I\xi_i^C$
Ph_1	[48 ; 51] ans	Lente
Ph_2, Ph_9, Ph_{14}, Ph_{15}, Ph_{16}, Ph_{17}, Ph_{20}	[15 ; 18] ans	Moyenne
Ph_3	[22 ; 35] ans	
Ph_{18}	[23 ; 35] ans	
Ph_4	[3 ; 5] ans	Très rapide
$Ph_{4\ bis}$	[0 ; 2] ans	
Ph_6	[0 ; 1] an	

Tableau 61 : Indicateurs de cinétique des phénomènes de la fenêtre

Pour les phénomènes correspondant à des erreurs de fabrication (Ph_7, Ph_{10}, Ph_{12}, Ph_{19}), telles que la *perte d'absorbeur d'humidité* lors du pliage de l'écarteur (Ph_7), leur durée est instantanée, par conséquent nous considérons que leur cinétique est « très rapide ».
Nous supposons que la condensation sur la couche basse émissivité (Ph_5) et sur le verre intérieur (Ph_8), que le décollement du joint d'étanchéité du joint d'adhérence couche (Ph_{11}) dû à un insuffisance du joint d'adhérence couche et que l'espacement entre le verre extérieur et le joint de calfeutrement extérieur (Ph_{13}) dû au vrillement de ce joint ont une durée inférieure à 5 ans, par conséquent ils ont une cinétique « très rapide ».

Déduction de la probabilité d'apparition résultante – $\xi_i = f\left(I\xi_i^D\ ;\ I\xi_i^C\right)$

La probabilité d'apparition de chaque phénomène se déduit des valeurs prises par ces indicateurs de démarrage – $I\xi_i^D$ – et de cinétique – $I\xi_i^C$ – à l'aide du tableau ci-après.

Nous proposons arbitrairement au tableau 62 des valeurs numériques permettant de passer des valeurs linguistiques présentées au tableau 26 de la partie B à ces valeurs numériques ; cette proposition est nécessaire pour pouvoir agréger ensuite les probabilités d'apparition des phénomènes pour obtenir la probabilité d'apparition des scénarii.

		Indicateur de cinétique - $I\xi_i^C$				
		Très rapide	Rapide	Moyenne	Lente	Très lente
Indicateur de démarrage $I\xi_i^D$	D	1	0,85	0,7	0,55	0,4
	C	0,85	0,7	0,55	0,4	0,3
	B	0,7	0,55	0,4	0,3	0,2
	A	0,55	0,4	0,3	0,2	0

Tableau 62 : Proposition arbitraire de correspondance entre valeurs linguistiques et numériques de la table d'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène

Remarque : les valeurs numériques proposées ci-dessus n'ont pas été validées puisque nous ne disposions pas de données de probabilité d'apparition réelles.

Les probabilités d'apparition des phénomènes de la fenêtre obtenues sur la base des valeurs du tableau 62 sont présentées dans le tableau suivant :

Phénomènes	Probabilité d'apparition - ξ_i
Ph_4, Ph_{4bis}, Ph_5, Ph_6, Ph_8, Ph_{11}	1
Ph_7, Ph_{10}, Ph_{12}, Ph_{13}, Ph_{19}	0,85
Ph_3, Ph_{20}	0,7
Ph_2, Ph_{14}, Ph_{15}, Ph_{18}	0,55
Ph_1, Ph_9, Ph_{16}, Ph_{17}	0,4

Tableau 63 : Probabilités d'apparition des phénomènes de la fenêtre

Agrégation des probabilités d'apparition du phénomène au scénario

La probabilité d'apparition ξ^j d'un scénario est obtenue en faisant le produit des probabilités d'apparition de ses phénomènes constitutifs, tel que décrit au I.3.2-d de la partie B.

Les probabilités d'apparition des scénarii de la fenêtre obtenues sur la base des valeurs du tableau 62 sont présentées dans le tableau suivant :

Scénario	Probabilité d'apparition ξ^j	Scénario	Probabilité d'apparition ξ^j	Scénario	Probabilité d'apparition ξ^j
Sc_1	0,154	Sc_4	0,131	Sc_7	0,172
Sc_2	0,131	Sc_5	0,172	Sc_8	0,146
Sc_3	0,154	Sc_6	0,146	Sc_9	0,016

Tableau 64 : Eventualité d'apparition des scénarii de la fenêtre

Gestion des interactions entre scénarii

La gestion des interactions entre scénarii consiste à déterminer les scénarii indépendants à retenir pour l'unification future avec les durées collectées au niveau de la fenêtre.

Parmi les neuf scénarii de la fenêtre que nous étudions, les quatre scénarii conduisant à une diminution de l'absorption d'infrarouge – Sc_1, Sc_2, Sc_5 et Sc_6 – sont liés par une relation en « OU », les quatre scénarii engendrant la diminution de visibilité – Sc_3, Sc_4, Sc_7 et Sc_8 – sont également liés entre eux par une relation en « OU » et le scénario de diminution de l'atténuation des bruits (Sc_9) est indépendant des huit autres scénarii.

Les relations d'interaction étant ici en « OU » la gestion de ces interactions revient à retenir, pour chacun des trois groupes de scénarii liés entre eux, le scénario qui a la plus grande probabilité d'apparition (*cf.* tableau 64) ; nous retenons donc les scénarii Sc_5, Sc_7 et Sc_9.

I.2.1.4. Obtention de la durée de vie de la fenêtre

Nous disposons maintenant de deux types de données temporelles pour pouvoir obtenir la durée de vie de la fenêtre, celles collectées directement au niveau de la fenêtre – données 1 à 10 du tableau 50 – et celles obtenues par agrégation du niveau du phénomène à celui du scénario – durées des scénarii Sc_5, Sc_7 et Sc_9 présentées dans le tableau 56.

La durée de vie de la fenêtre peut être obtenue soit :

- **solution 1** : par unification des données collectées au niveau de la fenêtre et des durées des scénarii Sc_5, Sc_7 et Sc_9,
- **solution 2** : par unification des durées des scénarii Sc_5, Sc_7 et Sc_9, puis par unification de ce résultat avec les données collectées au niveau de la fenêtre,
- **solution 3** : par unification de certaines des durées des scénarii Sc_5, Sc_7 et Sc_9 avec des données collectées au niveau de la fenêtre, puis par unification de ces résultats avec les données collectées au niveau de la fenêtre (éventuellement restantes).

Nous préférons ici opter pour la première solution dans la mesure où nous ne disposons pas de suffisamment d'information pour savoir à quel(s) scénario(i) se rapportent les données collectées au niveau de la fenêtre.

La fusion des données disponibles est faite par la méthode dite d'*intersection de l'ensemble maximum cohérent de masse maximale avec faible cohérence* (*cf.* I.2.3-d de la partie B) en acceptant un conflit de 0,12 pour une masse représentée de 91 %. Il en résulte la courbe de consensus de la figure 74.

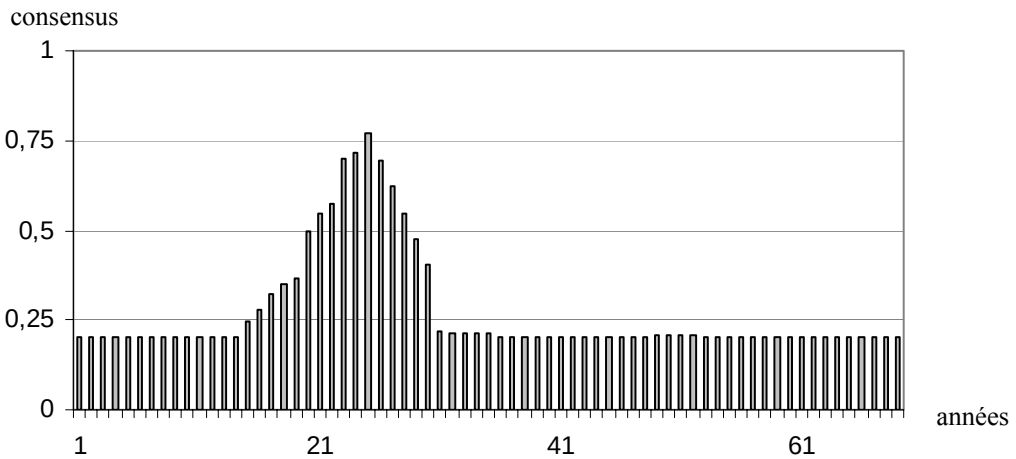


Figure 74 : Courbe de consensus des durées des Sc_5, Sc_7 et Sc_{10} et des données 1 à 10 du tableau 50

La durée de vie de la fenêtre obtenue pour 80 % du consensus est de [23 ; 27] ans, avec :

- *Bel* ([23 ; 27]) = 0,21,
- *Pl* ([23 ; 27]) = 0,91,
- *P* ([23 ; 27]) = 0,45.

La probabilité de Smets est plutôt importante, mais l'écart entre la croyance et la plausibilité est élevée (0,91 – 0,21 = 0,70), par conséquent cette durée de vie n'est pas une information très consensuelle.

I.2.2. Analyse quantitative temporelle du mur en béton

Objectif de ce paragraphe

Il s'agit d'illustrer la démarche d'évaluation des taux de transition entre phénomènes d'un même scénario du mur en béton, décrit précédemment (*cf.* I.1.2), pour la quantification temporelle de ce scénario.

Hypothèses pour le système étudié

H1 : nous considérons que le mur en béton est placé dans un environnement urbain « classique » de la métropole française, c'est-à-dire que l'intensité des agents environnementaux est « normale » ; nous affinons cette hypothèse par les valeurs suivantes :

- humidité relative : 60 %,
- concentration en CO_2 : 2.10^{-9} mol / mm^3,
- température moyenne : 20°C.

H2 : le mur en béton a une résistance de 30 MPa et un rapport eau sur ciment (w / c) de 0,55.

H3 : nous prenons en compte uniquement le scénario de « chute de morceaux » entraînant la carbonatation du béton, qui entraîne la corrosion des aciers, la fissuration du béton, la formation de sels gonflants, l'éclatement du béton et la chute de morceaux, dont la cinétique est accélérée par un enrobage insuffisant et une ségrégation du béton (*cf.* figure 63) et considérons qu'il est possible, c'est-à-dire que tous les phénomènes peuvent démarrer et se réaliser (avec une probabilité non nulle).

I.2.2.1. Détail du scénario étudié

Le scénario de « chute de morceaux » que nous étudions ici est celui schématisé à la figure suivante :

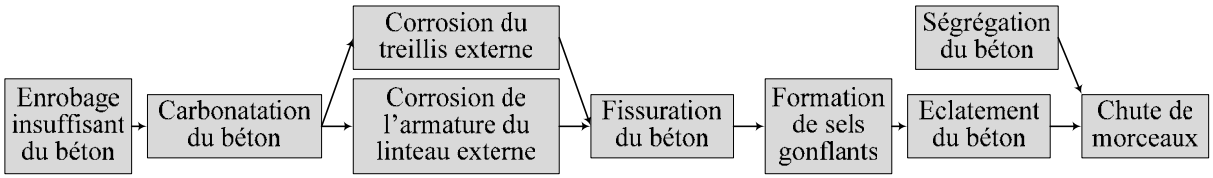


Figure 75 : Scénario de « chute de morceaux » du mur en béton

L'arbre des défaillances correspondant à ce scénario, présenté à la figure 76, permet de mettre en évidence les liens (relations en « ET » ou en « OU ») entre les phénomènes de ce scénario ; la construction de cet arbre est détaillée au III.2 de la partie B.

Nous cherchons à identifier l'ensemble des scénarii élémentaires du scénario de « chute de morceaux » qui ont des cinétiques différentes et indépendantes les unes des autres, pour pouvoir quantifier temporellement et indépendamment ces scénarii élémentaires, puis en déduire la durée du scénario de « chute de morceaux ».

Remarque : deux cinétiques indépendantes signifient ici que la cinétique d'un scénario ne modifie pas la cinétique de l'autre scénario.

Nous identifions ces scénarii élémentaires à partir de l'arbre des défaillances de la figure 76, il s'agit des scénarii liés par des relations en « OU » ; ils sont regroupés dans le tableau 65. Par exemple le scénario 1 correspond à la branche de l'arbre des défaillance représentée sur fond grisé à la figure 76.

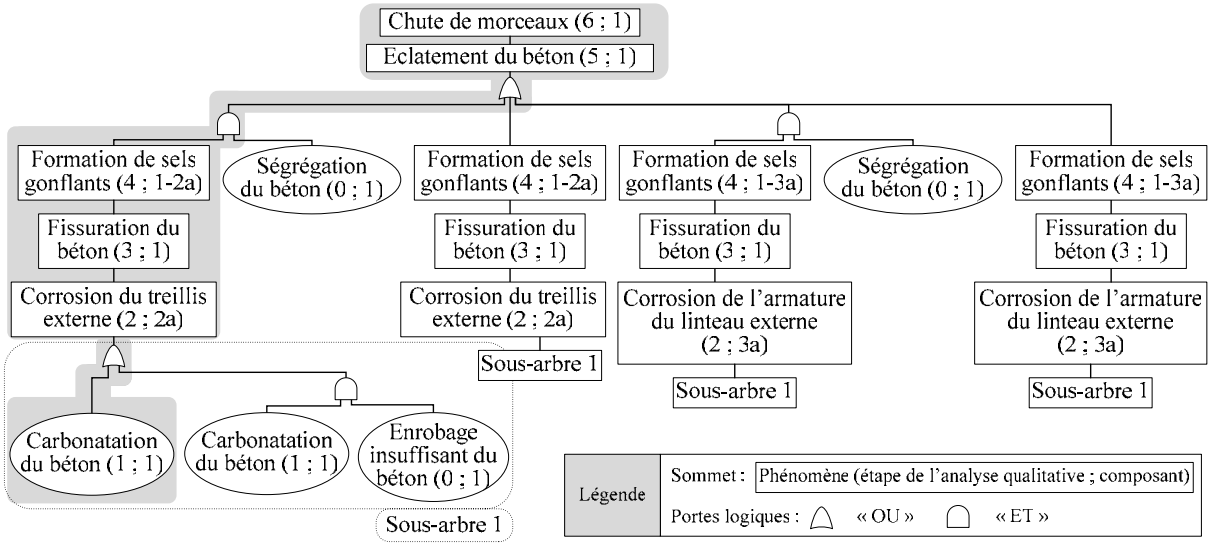


Figure 76 : Arbre des défaillances du scénario de « chute de morceaux » du mur en béton

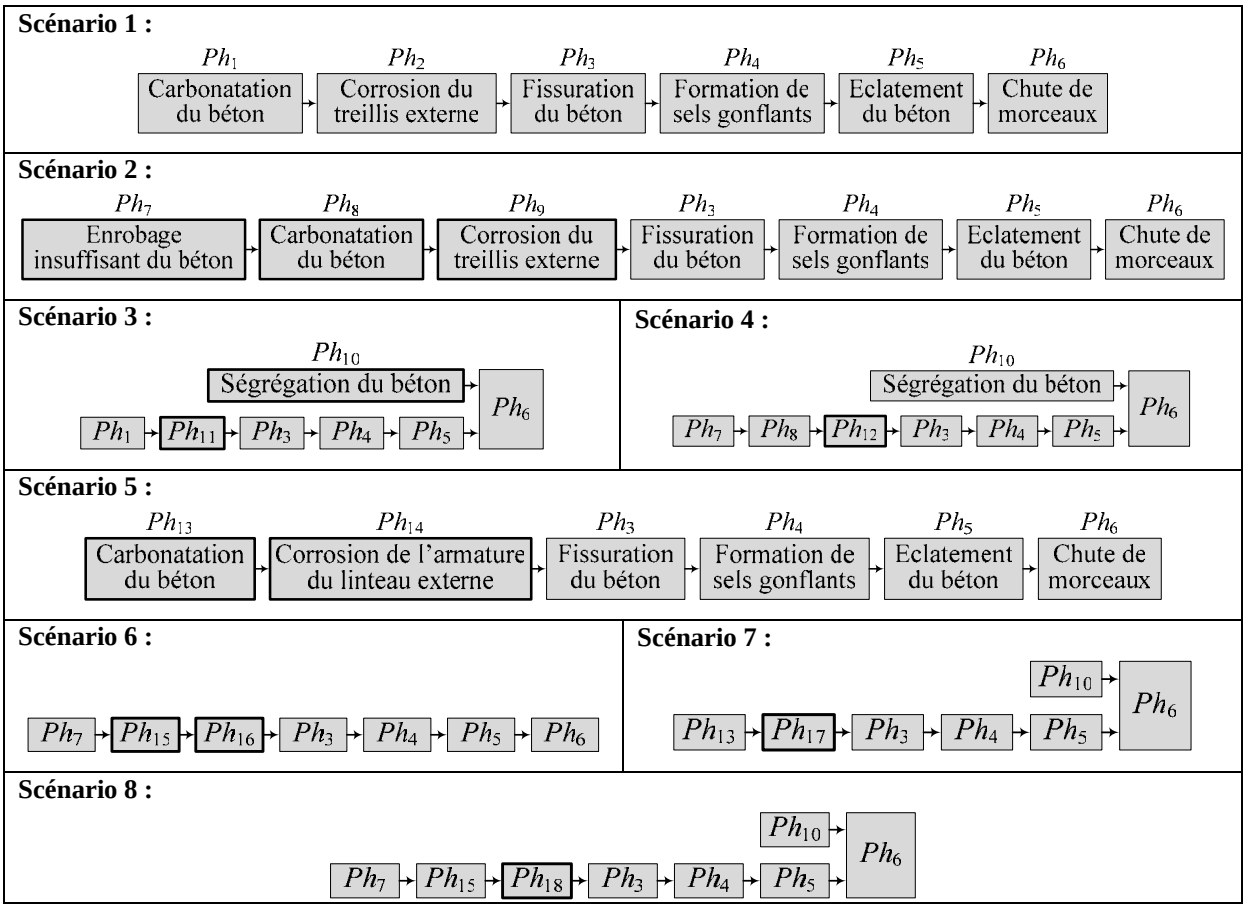


Tableau 65 : Liste des scénarii élémentaires du scénario de « chute de morceaux »

Remarques : nous ne prenons pas en compte l'effet de couplage que peuvent avoir la corrosion du treillis extérieur et la corrosion de l'armature du linteau externe sur la cinétique de la fissuration du béton.

Les Ph_1, Ph_8, Ph_{13} et Ph_{15} sont des phénomènes de carbonatation et les Ph_2, Ph_9, Ph_{11}, Ph_{12}, Ph_{14}, Ph_{16}, Ph_{17} et Ph_{18} sont des phénomènes de corrosion des aciers ayant des durées

distinctes du fait des caractéristiques géométriques et des enchaînements de phénomènes différents selon les scénarii considérés, tel que spécifié au I.2.2.3 de cette partie C.

I.2.2.2. Stratégie de quantification temporelle

L'ensemble des données collectées pour la quantification temporelle du mur en béton est présenté en annexe 15.

Objectif final : il s'agit ici de déterminer la durée du scénario de « chute de morceaux » du mur en béton.

Données disponibles :

- *2 durées au niveau du scénario* : donnée 1 (durée supérieure à 10 ans) et donnée 2 (durée comprise entre 60 et 80) de l'annexe 15,
- *44 durées au niveau des phénomènes* : données 3 à 46 de l'annexe 15 associées aux différents phénomènes (Ph_1 à Ph_{18}) des scénarii élémentaires décrits au tableau 65,
- *10 durées au niveau des scénarii* : données 47 à 56 de l'annexe 15, ces durées englobent le scénario de « chute de morceaux », le scénario de « faïençage » du béton, le scénario de « salissure » du béton et le scénario « d'efflorescence » du béton (*cf.* figure 63).

Données non disponibles : nous n'avons pas collecté de données de probabilité d'apparition.

Stratégie adoptée

En suivant l'arbre de choix de la stratégie de quantification temporelle présenté en annexe 9 :

1. nous évaluons la qualité des données disponibles (données 1 et 2) au point objectif (scénario de « chute de morceaux »). La transformation de la donnée 1 par un sous-ensemble flou donne une fonction d'appartenance triangulaire prenant comme valeurs « 1 » pour « 10 ans » et « 0 » pour « 20 ans » (*cf.* démarche illustrée au I.2.1.1), par conséquent ces deux données sont conflictuelles et donc non satisfaisantes ; nous passons alors au niveau juste inférieur, celui des phénomènes ;
2. nous évaluons la qualité des données disponibles (données 3 à 46) au niveau juste inférieur (phénomènes du scénario de « chute de morceau). Ces durées ont une qualité satisfaisante, par conséquent nous unifions les durées relatives aux mêmes référentiels puis les agrégeons au niveau du scénario ;
3. nous estimons les probabilités d'apparition des phénomènes Ph_1 à Ph_{18} puis des huit scénarii élémentaires ;
4. nous gérons les interactions entre les huit scénarii élémentaires. Ces scénarii étant liés par une relation en « OU » (*cf.* I.2.2.1), le scénario retenu sera celui ayant la plus forte probabilité d'apparition ;
5. nous unifions la durée du scénario élémentaire retenu avec les durées collectées au niveau du scénario (données 1 et 2) ;
6. nous unifions le résultat de l'étape 5 avec les durées collectées aux niveaux des scénarii (données 47 à 56) pour obtenir la durée du scénario de « chute de morceaux ». Nous procédons à cette dernière unification puisque nous n'avons pas collecté de données temporelles pour les scénarii de « faïençage », de « salissure » et « d'efflorescence », par conséquent nous affectons les durées des scénarii à celle du scénario de « chute de morceaux ».

I.2.2.3. Quantification temporelle des scénarii élémentaires du scénario « chute de morceaux »

Cette quantification correspond aux étapes 2 et 3 de la stratégie de traitement détaillée au paragraphe précédent.

Unification des durées des phénomènes et agrégation au niveau des scénarii élémentaires

L'ensemble des scénarii élémentaires font appels aux phénomènes de « carbonatation du béton » et de « corrosion des aciers », nous détaillons leur quantification ci-après.

Quantification de la carbonatation du béton (Ph_1, Ph_8, Ph_{13}, Ph_{15})

La durée du phénomène de carbonatation correspond ici au temps que met le front de carbonatation pour atteindre les aciers, c'est-à-dire pour parcourir l'épaisseur d'enrobage (*cf.* la structure du mur en béton présentée à la figure 62), soit :

- 25 mm si l'on considère le treillis soudé externe et les scénarii Sc_1 et Sc_3,
- 40 mm si l'on considère l'armature du linteau externe et les scénarii Sc_5 et Sc_7,
- 5 mm si l'on considère le treillis soudé externe et les scénarii Sc_2 et Sc_4 (nous faisons l'hypothèse que l'enrobage a été réduit de 20 mm, ce qui correspond à une malfaçon lors du processus de construction du mur en béton),
- 20 mm si l'on considère l'armature du linteau externe, les scénarii Sc_6 et Sc_8 et une malfaçon lors du processus de construction engendrant une diminution de 20 mm de l'épaisseur d'enrobage.

Les durées des phénomènes de carbonatation, obtenues par unification des données temporelles disponibles (données 3 à 22 de l'annexe 15) et en fonction des hypothèses présentées ci-dessus, sont résumées dans le tableau suivant :

	Données utilisées	Stratégie d'assemblage	Conflit	Masse représentée	Durée obtenue	*Bel*(.)	*Pl*(.)	*P*(.)
Ph_1	3 à 8	Intersection avec acceptation de conflit	0,26	100 %	[25 ; 28] ans	0,108	0,745	0,279
Ph_8	6, 9 à 12	Intersection de l'EMCMM avec faible cohérence et acceptation partielle de conflit	0,17	80 %	[1 ; 1,5] ans	0,225	0,953	0,576
Ph_{13}	6, 13 à 17		0,25	82 %	[61 ; 67] ans	0,14	0,747	0,325
Ph_{15}	6, 18 à 22		0,20	76 %	[23 ; 27] ans	0,217	0,795	0,299

Tableau 66 : Durées des phénomènes de carbonatation du mur en béton

Les valeurs peu élevées obtenues pour les croyances et les probabilités de Smets, pour les phénomènes Ph_1, Ph_8 et Ph_{15}, s'expliquent en partie par le fait que les modèles utilisés pour évaluer la durée de carbonatation donnent des valeurs ponctuelles proches mais non identiques, par conséquent la fusion de ces données n'engendre pas une information fortement consensuelle.

Quantification de la corrosion des aciers (Ph_2, Ph_9, Ph_{11}, Ph_{12}, Ph_{14}, Ph_{16}, Ph_{17}, Ph_{18})

Nous cherchons à évaluer ici la durée de corrosion des aciers qui est la durée séparant le temps d'atteinte des aciers par le front de carbonatation et la date où la fissuration du béton est suffisante pour que des morceaux de béton chutent.

En fait, nous regroupons les phénomènes de « corrosion des aciers », de « fissuration du béton », de « formation des sels gonflants », « d'éclatement du béton » et de « chute de morceaux » en un seul phénomène de « corrosion des aciers », puisque nous disposons de données temporelles permettant d'évaluer ce phénomène « global ». Nous avons en effet collecté des informations de vitesses de corrosion des aciers et de relations entre la perte de section des aciers et la largeur d'ouverture des fissures à la surface du béton.

Hypothèse : nous considérons arbitrairement qu'une largeur d'ouverture des fissures à la surface extérieure du béton de 1 mm en l'absence de ségrégation du béton et de 0,5 mm en présence de ségrégation du béton est suffisante pour faire chuter des morceaux de béton.
Les durées des phénomènes de corrosion des aciers, obtenues par unification des données temporelles disponibles (données 23 à 46 de l'annexe 15) et en fonction des hypothèses présentées ci-dessus, sont résumées dans le tableau suivant :

	Données utilisées	Stratégie d'assemblage	Conflit	Masse représentée	Durée obtenue	*Bel*(.)	*Pl*(.)	*P*(.)
Ph_2	23 à 25	Intersection	0,16	100 %	[40 ; 81] ans	0,279	0,838	0,494
Ph_9	26 à 28		0,17		[36 ; 71] ans	0,293	0,825	0,501
Ph_{11}	29 à 31		0,164		[22 ; 85] ans	0,292	0,836	0,513
Ph_{12}	32 à 34		0,169		[18 ; 36] ans	0,299	0,831	0,512
Ph_{14}	35 à 37		0,166		[28 ; 56] ans	0,302	0,834	0,512
Ph_{16}	38 à 40		0,172		[25 ; 50] ans	0,299	0,828	0,514
Ph_{17}	41 à 43		0,169		[17 ; 34] ans	0,299	0,831	0,511
Ph_{18}	44 à 46		0,16		[14 ; 28] ans	0,282	0,840	0,498

Tableau 67 : Durées des phénomènes de corrosion du mur en béton

Remarque : la stratégie d'assemblage des durées adoptée pour l'ensemble des phénomènes de corrosion est l'intersection avec acceptation totale du conflit (donc une masse représentée de 100 %) puisque le conflit est inférieur à 0,2.

La probabilité de Smets des durées présentées ci-dessus, est en moyenne de 0,51 avec un écart entre la croyance et la plausibilité qui est en moyenne égal à 0,54 ; par conséquent les résultats obtenus sont satisfaisants et fournissent une information assez consensuelle.

Agrégation des durées pour obtenir les durées des scénarii élémentaires

L'agrégation de ces durées consiste à sommer les durées des phénomènes de carbonatation du béton et de corrosion des aciers associés à chaque scénarii élémentaires. En effet, les durées des phénomènes de « fissuration du béton », de « formation des sels gonflants », « d'éclatement du béton » et de « chute de morceaux » sont intégrées dans les durées des phénomènes de corrosion des aciers ; et les durées des phénomènes « d'enrobage insuffisant » et de « ségrégation du béton » ont été prises en compte pour évaluer les durées des phénomènes de carbonatation et de corrosion.

Les durées des scénarii élémentaires obtenues, ainsi que les masses de croyances associées, sont regroupées dans le tableau suivant :

	Durée	Masse de croyance
Sc_1	[65 ; 109] ans	0,279
Sc_2	[37 ; 72,5] ans	0,501
Sc_3	[47 ; 113] ans	0,279
Sc_4	[19 ; 37,5] ans	0,512

	Durée	Masse de croyance
Sc_5	[89 ; 123] ans	0,325
Sc_6	[48 ; 77] ans	0,299
Sc_7	[78 ; 101] ans	0,325
Sc_8	[37 ; 55] ans	0,299

Tableau 68 : Durées et masses de croyance des scénarii élémentaires du scénario « chute de morceaux »

Estimation de la probabilité d'apparition des scénarii élémentaires de « chute de morceaux »

La démarche d'estimation de la probabilité d'apparition ξ^j des dix-huit phénomènes puis des huit scénarii élémentaires est identique à celle détaillée pour l'application de la fenêtre fixe, par conséquent nous ne présentons ici, dans le tableau suivant, que les résultats obtenus :

	ξ^j
Sc_1	0,220
Sc_2	0,397

	ξ^j
Sc_3	0,103
Sc_4	0,338

	ξ^j
Sc_5	0,220
Sc_6	0,257

	ξ^j
Sc_7	0,220
Sc_8	0,327

Tableau 69 : Probabilité d'apparition des scénarii élémentaires

Le scénario élémentaire retenu pour être unifié avec les données 1 et 2 (de l'annexe 15) est le scénario Sc_2, puisque c'est le plus probable. Les résultats de l'unification (par la méthode dite d'*intersection* avec acceptation totale du conflit – égal à 0,11 – donc une masse représentée de 100 %) de la durée du scénario Sc_2 avec les données 1 et 2 sont :

- durée : [60 ; 72,5] ans,
- croyance : 0,144,
- plausibilité : 0,89,
- probabilité de Smets : 0,409.

I.2.2.4. Durée du scénario de « chute de morceaux »

La courbe de consensus résultant de l'unification de la durée obtenue ci-dessus et des données 47 à 56 (de l'annexe 15) – celles relatives à la durée des scénarii du mur en béton – est présentée à la figure suivante :

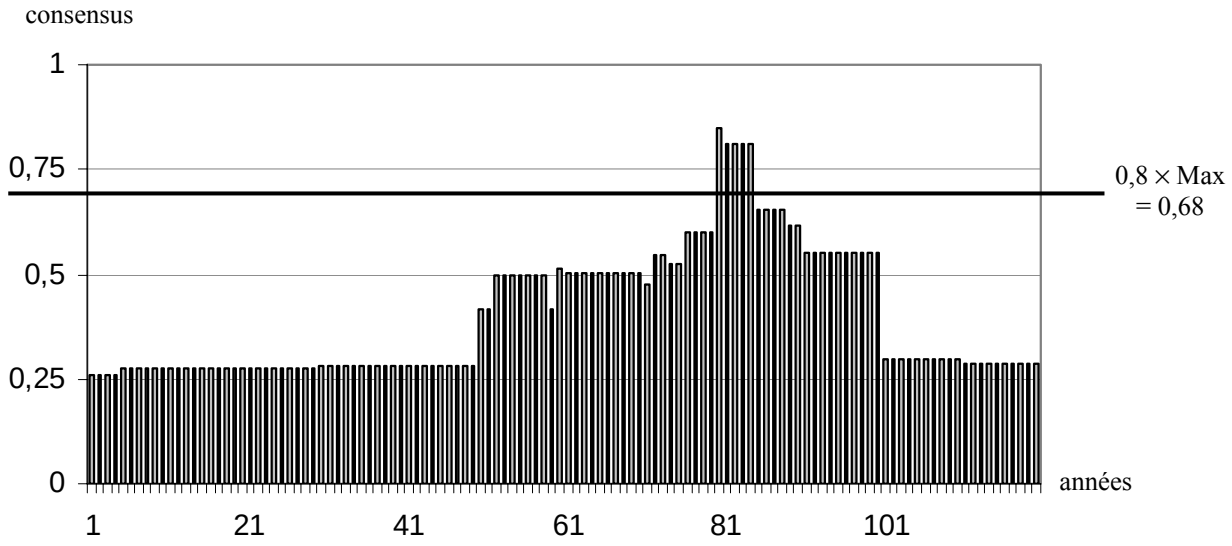


Figure 77 : Courbe de consensus du scénario de « chute de morceaux »

La stratégie d'assemblage utilisée pour obtenir cette courbe de consensus est l'intersection avec faible cohérence, avec un conflit de 0,149 pour une masse représentée de 77 %. La durée du scénario de « chute de morceaux » est donc égale à [80 ; 84] ans avec une croyance de 0,053, une plausibilité de 0,85 et une probabilité de 0,362. Les valeurs de ces indicateurs de qualité montrent que la donnée obtenue représente une information faiblement consensuelle.

I.2.2.5. Durées de l'ensemble des scénarii du mur en béton

Les durées, leurs masses de croyance et les probabilités d'apparition des huit scénarii de « chute de morceaux » étant présentés dans les tableaux 29 et 30, nous ne présentons donc ici que les valeurs de ces attributs obtenues pour les quatre autres scénarii du mur en béton, à savoir le scénario de « faïençage » du béton (Sc_9), le scénario de « salissure » du béton (Sc_{10}), le scénario « d'efflorescence » du béton (Sc_{11}) et le scénario « d'écrasement du complexe isolant (Sc_{12}) ; les valeurs sont synthétisées dans le tableau 70.

Nous faisons l'hypothèse que la durée du scénario de « faïençage » est égale à la durée que met le front de carbonatation pour atteindre une profondeur de 20 mm. La durée de ce scénario et sa masse de croyance correspondent alors à la durée et à la probabilité de Smets associées au phénomène 15.
La durée du scénario « d'écrasement » du complexe isolant (Sc_{12}) et sa masse de croyance ont été obtenues par unification des données collectées 57 à 62 de l'annexe 15.
Ne disposant pas de données temporelles pour les scénarii de « salissure » du béton (Sc_{10}) et « d'efflorescence » du béton (Sc_{11}), nous avons déclaré les durées de ces scénarii et leurs masses de croyance.
Les probabilités des scénarii Sc_9 à Sc_{12} ont été estimées selon la démarche détaillée au I.2.1.3.

		Probabilité d'apparition	Durée	Masse de croyance
Sc_9	Faïençage du béton	0,400	[23 ; 27] ans	0,299
Sc_{10}	Salissure du béton	0,700	[5 ; 15] ans	0,25
Sc_{11}	Efflorescence du béton	0,490	[23 ; 27] ans	0,25
Sc_{12}	Ecrasement du complexe isolant	0,397	[20 ; 43] ans	0,683

Tableau 70 : Durées, masses de croyance et probabilités d'apparition des scénarii Sc_9 à Sc_{12} du mur en béton

I.3. Applications de l'analyse quantitative de la criticité

Nous présentons successivement dans ce paragraphe les analyses quantitatives de la criticité du mur en béton, du mur en briques puis la comparaison des résultats de ces deux analyses.

I.3.1. Analyse quantitative de la criticité du mur en béton

Objectif de ce paragraphe
Il s'agit de présenter les différentes étapes de l'analyse de la criticité (évaluation de la gravité d'un scénario, classement des scénarii par classe de criticité, évaluation de la criticité, hiérarchisation des scénarii par ordre de criticité) sur l'application du mur en béton à partir de la sélection des scénarii présentés lors de l'analyse qualitative de ce produit (*cf.* figure 63).

Hypothèses pour le système étudié
Nous faisons les mêmes hypothèses (environnement, conséquences des scénarii, fonctions prises en compte) que celles formulées lors de l'analyse qualitative de ce produit (*cf.* I.1.2).

I.3.1.1. Evaluation de la gravité des scénarii

La gravité d'un scénario (Sc_j) est évaluée à partir des quatre critères d'impact du scénario sur la robustesse du produit ($I_{RP}Sc_j$), d'impact sur la maintenabilité du produit ($I_{MP}Sc_j$), d'impact sur la robustesse de l'ouvrage ($I_{RO}Sc_j$) et d'impact sur la maintenabilité de l'ouvrage ($I_{MO}Sc_j$). Ces critères sont décrits au I.4.2-a de la partie B.

Impact sur la robustesse du produit - $I_{RP}Sc_j$:
L'évaluation de l'impact du scénario sur la robustesse du produit est obtenue en agrégeant les résultats d'impact des phénomènes sur la robustesse du produit.
Nous procédons successivement au classement des fonctions du produit, à l'évaluation du degré de participation des composants aux fonctions, à l'évaluation de l'impact des phénomènes sur les fonctions du produit puis de l'impact de ces phénomènes sur la robustesse d'un produit.

Classement des fonctions du produit

Le résultat de ce classement est présenté dans le tableau 71.

	Désignation	Classement	Justification
Fp_1	Stopper	Très importante	En second plan par rapport aux fonctions « essentielle »
Fp_2	Absorber	Essentielle	Classe maximale
Fp_3	Résister mécaniquement	Essentielle	Classe maximale
Fs_4	Etre intègre	Très importante	En second plan par rapport aux fonctions « essentielle »
Fp_5	Etre conforme	Essentielle	Classe maximale

Tableau 71 : Classement des fonctions du mur en béton

Evaluation du degré de participation des composants aux fonctions

Le degré de participation des composants aux fonctions est défini uniquement pour les couples {composant ; fonctions} identifiés lors de l'analyse fonctionnelle ; les estimations de ce degré de participation sont synthétisées dans le tableau 72.

Nous estimons que la structure et le revêtement ont une même participation « élevée » à « stopper » les flux de passage des agents environnementaux (du milieu extérieur pour la structure, et du milieu intérieur pour le revêtement).

Nous considérons que la structure et le complexe isolant (plot de colle – formant une lame d'air entre le mur en béton et le doublage – doublage et isolant) participent tous de la même manière (participation « élevée ») aux conforts thermique et acoustique (Fp_2) du mur.

Le degré de participation de la structure et des armatures (de peau et du linteau) est « élevé » pour la résistance mécanique puisqu'elles contribuent à la stabilité du produit vis-à-vis des actions mécaniques du milieu extérieur et du bâtiment dans lequel il est intégré. Nous jugeons le degré de participation du doublage et de l'isolant comme « moyen » puisqu'ils assurent uniquement leur auto stabilité, par contre les plots de colle ont un degré « élevé » puisque le maintien en position (Fp_3) du doublage sur le mur en béton constitue sa principale fonction. La participation des épingles et du revêtement est jugée « faible » vis-à-vis de la résistance mécanique, puisqu'ils ont une certaine résistance mécanique propre mais ils ne contribuent pas à la résistance mécanique du produit.

Pour ce qui est de l'intégrité, nous estimons comme « élevé » le degré de participation des composants directement en contact avec l'environnement (structure et revêtement) et comme « faible » pour les autres composants.

Nous considérons que tous les composants répondent aux réglementations et exigences en vigueur, leur degré de participation à la fonction de conformité (Fp_5) est donc « élevé ».

		Structure	Armature de peau	Armature du linteau	Epingle	Plot de colle	Doublage	Isolant	Revêtement
Fp_1	Stopper	Elevé							Elevé
Fp_2	Absorber	Elevé				Elevé	Elevé	Elevé	
Fp_3	Résister mécaniquement	Elevé	Elevé	Elevé	Faible	Elevé	Moyen	Moyen	Faible
Fs_4	Etre intègre	Elevé	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Elevé
Fp_5	Etre conforme	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé

Tableau 72 : Degré de participation des composants du mur en béton à ses fonctions

Evaluation de l'impact des phénomènes sur les fonctions du produit

Les estimations d'impact des phénomènes sur les fonctions du mur en béton que nous proposons pour les phénomènes des scénarii sélectionnés lors de l'analyse qualitative de ce mur sont regroupées dans le tableau 73.

Nous considérons par exemple que la ségrégation du béton (phénomène) a un impact « moyen » sur la résistance mécanique Fp_3 (fonction) du mur en béton (produit) – alors que la corrosion des armatures par exemple a un impact « fort » sur cette résistance – et que cette ségrégation a un impact « fort » sur la fonction de conformité aux exigences Fp_5, puisque la ségrégation se traduit généralement par une apparition de granulats en partie inférieure du mur, ce qui n'est pas très esthétique visuellement.

Phénomène	Composant	Fonction	Impact
Ségrégation	Structure	Fp_3	Moyen
		Fp_5	Fort
Enrobage insuffisant	Structure	Fp_1, Fs_4	Faible
		Fp_2	Moyen
		Fp_3, Fp_5	Fort
Carbonatation	Structure	Fp_1, Fs_4	Fort
		Fp_3	Moyen
Salissure	Structure	Fp_5	Moyen
Lixiviation	Structure	Fp_3	Moyen
		Fs_4	Fort
Ecrasement	Isolant, Doublage, Plot de colle	Fp_2, Fp_3, Fp_5	Fort
		Fs_4	Faible
Corrosion	Armature de peau, Armature du linteau, Epingle	Fp_3	Fort
		Fs_4	Moyen

Phénomène	Composant	Fonction	Impact
Faïençage	Structure	Fp_5	Moyen
Efflorescence	Structure	Fp_5	Moyen
Fissuration	Structure	Fp_1	Fort
		Fp_3	Moyen
		Fs_4	Moyen
Formation de sels gonflants	Structure – Armature de peau, Armature du linteau, Epingle	Fp_3	Fort
		Fs_4	Moyen
Eclatement	Structure	Fp_1, Fp_2	Fort
		Fp_3, Fs_4, Fp_5	Moyen
Chute de morceaux	Structure	Fp_1, Fp_2	Fort
		Fp_3, Fs_4, Fp_5	Moyen

Tableau 73 : Estimation de l'impact des phénomènes sur les fonctions du mur en béton

Evaluation de l'impact des phénomènes sur la robustesse du produit - $I_{RP}Ph_i$

A partir des estimations précédentes (classement des fonctions, degré de participation et impact des phénomènes sur les fonctions) et de la grille d'évaluation rappelée au tableau 74, nous pouvons en déduire l'impact des phénomènes sur la robustesse du mur en béton pour chacune des fonctions associées à ces phénomènes, $I_{RP}Ph_i(F_k)$.

	Classe fonctionnelle											
	Essentielle			Très importante			Importante			Peu importante		
Classe d'impact	Degré de participation											
	Élevé	Moyen	Faible	Élevé	Moyen	Faible	Élevé	Moyen	Faible	Élevé	Moyen	Faible
Fort	1,00	0,90	0,80	0,85	0,75	0,65	0,70	0,60	0,50	0,55	0,45	0,35
Moyen	0,90	0,80	0,70	0,75	0,65	0,55	0,60	0,50	0,40	0,45	0,35	0,25
Faible	0,80	0,70	0,60	0,65	0,55	0,45	0,50	0,40	0,30	0,35	0,25	0,15
Négligeable	0,70	0,60	0,50	0,55	0,45	0,35	0,40	0,30	0,20	0,25	0,15	0,00

Tableau 74 : Grille d'évaluation de l'impact des phénomènes sur la robustesse du produit

Par exemple, si l'on considère l'impact de la ségrégation, Ph_{10}, du béton (structure) pour la fonction de résistance mécanique (Fp_3) sur la robustesse du produit, nous avons :

- *classement de la fonction* : « essentielle »,
- *degré de participation du composant* : « élevé »,
- *impact du phénomène sur la fonction* : « moyen ».

Par conséquent l'impact de ce phénomène pour la fonction Fp_3 sur la robustesse du mur est $I_{RP}Ph_{10}(Fp_3) = 0{,}9$.

Le résultat de cette évaluation pour l'ensemble des couples {phénomène ; fonction} est présenté dans le tableau 75.

Nous rappelons que les numéros des composants et des fonctions sont :

- composants : 1 – Structure, 2a – Armature de peau externe, 3a – Armature du linteau externe, 4 – Epingle, 5 – Plot de colle, 6 – Doublage, 7 – Isolant et 8 – Revêtement,
- fonctions : Fp_1 – Stopper, Fp_2 – Absorber, Fp_3 – Résister mécaniquement, Fs_4 – Etre intègre et Fp_5 – Etre conforme.

Phénomène	Composant	Fonction	Impact
Ségrégation	1	Fp_3	0,9
		Fp_5	1
Enrobage insuffisant	1	Fp_1, Fs_4	0,65
		Fp_2	0,9
		Fp_3, Fp_5	1
Carbonatation	1	Fp_1	1
		Fp_3	0,9
		Fs_4	0,85
Salissure	1	Fp_5	0,9
Lixiviation	1	Fp_3	0,9
		Fs_4	0,85
Ecrasement	7, 6, 5	Fp_2, Fp_5	1
		Fs_4	0,9
	7, 6	Fs_4	0,45
	5	Fp_3	1
Corrosion	2a, 3a	Fp_3	1
	2a, 3a, 4	Fs_4	0,55

Phénomène	Composant	Fonction	Impact
Corrosion	4	Fp_3	0,8
Faïençage	1	Fp_5	0,9
Efflorescence	1	Fp_5	0,9
Fissuration	1	Fp_1	0,85
		Fp_3	0,9
		Fs_4	0,75
Formation de sels gonflants	1-2a, 1-3a	Fp_3	1
	1-2a, 1-3a, 1-4	Fs_4	0,55
	1-4	Fp_3	0,8
Eclatement	1	Fp_1	0,85
		Fp_2	1
		Fp_3, Fp_5	0,9
		Fs_4	0,75
Chute de morceaux	1	Fp_1	0,85
		Fp_2	1
		Fp_3, Fp_5	0,9
		Fs_4	0,75

Tableau 75 : Estimation de l'impact des phénomènes, par fonction, sur la robustesse du mur en béton

L'impact d'un phénomène Ph_i sur la robustesse du mur $I_{RP}Ph_i$ est alors égal à :

$$I_{RP}Ph_i = \underset{k}{moy}\left(I_{RP}Ph_i\left(F_k\right)\right) \quad \textbf{[40]}$$

En prenant de nouveau l'exemple de la ségrégation du béton, nous avons $I_{RP}Ph_{10}(Fp_3) = 0,9$ et $I_{RP}Ph_{10}(Fp_5) = 1$, par conséquent l'impact de ce phénomène sur la robustesse du produit est : $I_{RP}Ph_{10} = (0,9 + 1) / 2 = 0,95$.

Evaluation de l'impact des scénarii sur la robustesse du produit - $I_{RP}Sc_j$

L'impact d'un scénario Sc_j sur la robustesse du produit, $I_{RP}Sc_j$, est déduit de l'impact de ses phénomènes constitutifs $I_{RP}Ph_i$ par la formule suivante :

$$I_{RP}Sc_j = \underset{i}{moy}\left(I_{RP}Ph_i\right) \quad \textbf{[41]}$$

Par exemple, pour le premier scénario (Sc_1) de « chute de morceaux » de béton, composé des phénomènes de « carbonatation du béton », de « corrosion de l'armature de peau », de « fissuration du béton », de « formation de sels gonflants », « d'éclatement du béton » et de « chute de morceaux », nous avons :

- $I_{RP}Ph_1 = 0,917$ (carbonatation du béton),
- $I_{RP}Ph_2 = 0,775$ (corrosion de l'armature de peau),
- $I_{RP}Ph_3 = 0,833$ (fissuration du béton),
- $I_{RP}Ph_4 = 0,775$ (formation de sels gonflants),
- $I_{RP}Ph_5 = 0,88$ (éclatement du béton),
- $I_{RP}Ph_6 = 0,88$ (chute de morceaux).

Par conséquent, $I_{RP}Sc_1 = 0,843$.

Le résultat de l'évaluation de l'impact de l'ensemble des scénarii sur la robustesse du mur en béton est regroupé dans le tableau suivant :

	$I_{RP}Sc_j$
Sc1	0,843
Sc2	0,843
Sc3	0,859

	$I_{RP}Sc_j$
Sc4	0,856
Sc5	0,843
Sc6	0,843

	$I_{RP}Sc_j$
Sc7	0,859
Sc8	0,856
Sc9	0,908

	$I_{RP}Sc_j$
Sc10	0,900
Sc11	0,888
Sc12	0,846

Tableau 76 : Impact des scénarii sur la robustesse du mur en béton - $I_{RP}Sc_j$

Impact du scénario Sc_j sur la maintenabilité du produit – $I_{MP}Sc_j$

L'évaluation de l'impact d'un scénario Sc_j sur la maintenabilité du mur en béton $I_{MP}Sc_j$ est déduite de l'estimation des quatre sous-critères de :

- « détectabilité » des conséquences de ce scénario $C_{MP\text{-}1}Sc_j$,
- « d'accessibilité » de ces conséquences $C_{MP\text{-}2}Sc_j$,
- de « dissociabilité » des composants associés à ce phénomène $C_{MP\text{-}3}Sc_j$,
- de « coûts » engendrés par les opérations de maintenance $C_{MP\text{-}4}Sc_j$.

L'estimation de ces sous-critères est aidée par la grille d'évaluation présentée au tableau 29 de la partie B, puis l'impact de Sc_j sur la maintenabilité du mur en béton est donné par :

$$I_{MP}Sc_j = \frac{C_{MP-1}Sc_j + C_{MP-2}Sc_j + C_{MP-3}Sc_j + C_{MP-4}Sc_j}{4} \quad \textbf{[42]}$$

Par exemple, pour le scénario Sc_1 « chute de morceaux » de béton, nous estimons que :

- $C_{MP\text{-}1}Sc_1 = 1$: ce scénario est « facilement détectable visuellement »,
- $C_{MP\text{-}2}Sc_1 = 2/3$: ce scénario est « accessible avec un peu d'équipement », si la chute de morceaux apparaît sur la partie supérieure du mur,
- $C_{MP\text{-}3}Sc_1 = 0$: la structure est « non dissociable » du mur,
- $C_{MP\text{-}4}Sc_1 = 2/3$: les coûts engendrés par la réfection des parties de mur détachées sont « assez important ».

L'impact de ce scénario sur la maintenabilité du mur est alors égal à (1 + 2/3 + 0 + 2/3)/4, soit 0,583.

Les évaluations de l'impact de l'ensemble des scénarii sur la maintenabilité du mur obtenues sont regroupées dans le tableau suivant :

	« Détectabilité »	« Accessibilité »	« Dissociabilité »	« Coûts »	$I_{MP}Sc_j$
Sc_1 à Sc_9, Sc_{11}	0	1/3	1	2/3	0,500
Sc_{10}	0	1/3	1	1/3	0,417
Sc_{12}	0	0	2/3	2/3	0,333

Tableau 77 : Impact des scénarii sur la maintenabilité du mur en béton - $I_{MP}Sc_j$

Impact sur la robustesse de l'ouvrage - $I_{RO}Sc_j$

Nous considérons ici que l'ouvrage est un bâtiment.

L'évaluation de l'impact d'un scénario Sc_j sur la robustesse de l'ouvrage $I_{RO}Sc_j$ est déduite de l'estimation des deux sous-critères :

- « nature » de la partie d'ouvrage dégradée $C_{RO\text{-}1}Sc_j$,
- « l'ampleur » de cette dégradation $C_{RO\text{-}2}Sc_j$.

L'estimation de ces sous-critères est aidée par la grille d'évaluation présentée au tableau 30 de la partie B, puis l'impact de Sc_j sur la robustesse de l'ouvrage est donné par :

$$I_{RO}Sc_j = \frac{C_{RO-1}Sc_j + C_{RO-2}Sc_j}{2} \quad \textbf{[43]}$$

Par exemple, pour le premier scénario (Sc_1) de « chute de morceaux » de béton, nous obtenons :

- $C_{RO\text{-}1}Sc_1$ = 2/3 : ce scénario a un impact sur « l'enveloppe de l'ouvrage », puisqu'il s'agit d'un mur non porteur,
- $C_{RO\text{-}2}Sc_1$ = 2/3 : ce scénario a une ampleur « importante »,

Par conséquent l'impact de ce scénario sur la robustesse du bâtiment est égal à 2/3.

Le résultat de l'évaluation de l'impact de l'ensemble des scénarii sur la robustesse est présenté dans le tableau suivant :

	Ampleur	Nature	$I_{RO}Sc_j$
Sc_1 à Sc_9, Sc_{11}	2/3	2/3	0,667
Sc_{10}	2/3	1/3	0,500
Sc_{12}	1/3	2/3	0,500

Tableau 78 : Impact des scénarii sur la robustesse du bâtiment - $I_{RO}Sc_j$

Impact sur la maintenabilité de l'ouvrage - $I_{MO}Sc_j$

L'impact d'un scénario Sc_j sur la maintenabilité de l'ouvrage $I_{MO}Sc_j$ résulte de l'estimation des deux sous-critères :

- « dissociabilité » du mur du bâtiment $C_{MO\text{-}1}Sc_j$,
- « coûts » engendrés par les opérations de maintenance nécessaires à la réparation des conséquences de ce scénario $C_{MO\text{-}2}Sc_j$.

L'estimation de ces sous-critères est aidée par la grille d'évaluation présentée au tableau 31 de la partie B, puis l'impact de Sc_j sur la maintenabilité de l'ouvrage est donné par :

$$I_{MO}Sc_j = \frac{C_{MO-1}Sc_j + C_{MO-2}Sc_j}{2} \quad \textbf{[44]}$$

Par exemple, pour le scénario Sc_1 de « chute de morceaux » de béton, nous estimons que :

- $C_{MO\text{-}1}Sc_1$ = 0 : la structure en béton et les armatures sont « non dissociables » du bâtiment,
- $C_{RO\text{-}2}Sc_1$ = 2/3 : les opérations nécessaires à la réfection des parties détachées sont « assez important ».

Par conséquent, l'impact de ce scénario sur la robustesse de l'ouvrage du mur est égal à 1/3.

Le résultat de l'évaluations de l'impact de l'ensemble des scénarii sur la maintenabilité du bâtiment est présenté dans le tableau suivant :

	Dissociabilité	Coûts	$I_{MO}Sc_j$
Sc_1 à Sc_9, Sc_{11}	1	2/3	0,833
Sc_{10}	1	1/3	0,667
Sc_{12}	2/3	2/3	0,667

Tableau 79 : Impact des scénarii sur la maintenabilité du bâtiment - $I_{MO}Sc_j$

Gravité des scénarii - G^j

La gravité G^j d'un scénario Sc_j est prise égale à la moyenne des évaluations des quatre critères déterminés ci-dessus (impact sur la robustesse du mur, impact sur la maintenabilité du mur, impact sur la robustesse du bâtiment, impact sur la maintenabilité du bâtiment).

Par exemple, pour le scénario Sc_1 de « chute de morceaux » de béton, nous avons obtenu :

- $I_{RP}Sc_1 = 0{,}843$,
- $I_{MP}Sc_1 = 0{,}500$,
- $I_{RO}Sc_1 = 0{,}667$,
- $I_{MO}Sc_1 = 0{,}833$.

Par conséquent $G^1 = 0{,}711$.

Les gravités obtenues pour les scénarii du mur en béton sont regroupées dans le tableau suivant :

	G^j
Sc_1	0,711
Sc_2	0,711
Sc_3	0,715

	G^j
Sc_4	0,714
Sc_5	0,711
Sc_6	0,711

	G^j
Sc_7	0,715
Sc_8	0,714
Sc_9	0,727

	G^j
Sc_{10}	0,621
Sc_{11}	0,722
Sc_{12}	0,587

Tableau 80 : Gravité des scénarii du mur en béton - G^j

I.3.1.2. Classement des scénarii par ordre de criticité

Cette étape de classement des scénarii par ordre de criticité consiste à définir des seuils de criticité, vis-à-vis des critères de gravité, de probabilité d'apparition et de durée des scénarii, permettant de distinguer les trois classes de criticité (majeure, significative et mineure), puis à classer les scénarii en comparant leurs valeurs de gravité, de probabilité d'apparition et de durée par rapport à ces seuils de criticité.

Rappel des scénarii et de leurs attributs : nous rappelons dans le tableau suivant, les valeurs de gravité, de probabilité d'apparition et de durée des douze scénarii du murs en béton ainsi que les masses de croyance associées à ces durées.

		Probabilité d'apparition – ξ^j	Durée δDu^j	Masse de croyance de la durée	Gravité G^j
Sc_1	Chute de morceaux	0,220	[65 ; 109] ans	0,279	0,711
Sc_2	*Chute de morceaux*	*0,397*	*[37 ; 72,5] ans*	*0,501*	*0,711*
Sc_3	Chute de morceaux	0,103	[47 ; 113] ans	0,279	0,715
Sc_4	*Chute de morceaux*	*0,338*	*[19 ; 37,5] ans*	*0,512*	*0,714*
Sc_5	Chute de morceaux	0,220	[89 ; 123] ans	0,325	0,711
Sc_6	*Chute de morceaux*	*0,257*	*[48 ; 77] ans*	*0,299*	*0,711*
Sc_7	Chute de morceaux	0,220	[78 ; 101] ans	0,325	0,715
Sc_8	*Chute de morceaux*	*0,327*	*[37 ; 55] ans*	*0,299*	*0,714*
Sc_9	*Faïençage*	*0,400*	*[23 ; 27] ans*	*0,299*	*0,727*
Sc_{10}	**Salissure**	**0,700**	**[5 ; 15] ans**	**0,25**	**0,621**
Sc_{11}	*Efflorescence*	*0,490*	*[23 ; 27] ans*	*0,25*	*0,722*
Sc_{12}	*Ecrasement*	*0,397*	*[20 ; 43] ans*	*0,683*	*0,587*

Tableau 81 : Récapitulatif des gravités, probabilités d'apparition et durées des scénarii du mur en béton

Les seuils de criticité peuvent être fixés de différentes manières, par exemple :

- seuils de criticité de la durée : ils peuvent être pris égaux aux durées séparant deux inspections programmées du mur, aux durées des garanties établies pour ce mur, etc.,
- seuils de criticité des probabilités et des gravités : ils peuvent être fixés par référence à des scénarii que l'on classerait a priori dans l'une des classes de criticité.

Ici, nous considérons arbitrairement que le scénario Sc_{10} a une criticité « importante », que le scénario Sc_2 a une criticité « significative » et nous en déduisons les seuils de criticité présentés dans le tableau ci-après :

	Criticité majeure	**Seuils 1**	Criticité significative	**Seuils 2**	Criticité mineure
Probabilité d'apparition	$\xi^j \geq 0{,}6$	**0,6**	$0{,}6 > \xi^j \geq 0{,}25$	**0,25**	$0{,}25 > \xi^j$
Durée	$moy(\delta Du^j) \leq 15$	**15**	$15 < moy(\delta Du^j) \leq 70$	**70**	$70 < moy(\delta Du^j)$
Gravité	$G^j \geq 0{,}6$	**0,6**	$0{,}6 > G^j \geq 0{,}5$	**0,5**	$0{,}5 > G^j$

Tableau 82 : Seuils de criticité pour le classement des scénarii du mur en béton

La classe de criticité est ensuite définie selon la formule suivante :

Classe de Sc_j = min {Classe de Sc_j pour ξ^j ; Classe de Sc_j pour $moy(\delta Du^j)$; Classe de Sc_j pour G^j } **[45]**

Par exemple, pour le scénario Sc_{11}, nous avons :

- ξ^{11} = 0,49, c'est-à-dire *Seuil* 1 > ξ^{11} > *Seuil* 2, donc « Classe pour Sc_{11} de ξ^{11} » = « Criticité significative »,
- $moy(\delta Du^{11})$ = 25 ans ((27 + 23)/2), c'est-à-dire *Seuil* 1 < $moy(\delta Du^{11})$ < *Seuil* 2, donc « Classe pour Sc_{11} de $moy(\delta Du^{11})$ » = « Criticité significative »,
- G^{11} = 0,722, c'est-à-dire G^{11} > Seuil 1, donc « Classe pour Sc_{11} de G^{11} » = « Criticité majeure »

Par conséquent, ce scénario est classé en « criticité significative ».

Le classement des scénarii du mur en béton obtenu selon les seuils définis au tableau 82 est le suivant :

- criticité majeure : Sc_{10},
- criticité significative : Sc_2, Sc_4, Sc_6, Sc_8, Sc_9, Sc_{11} et Sc_{12},
- criticité mineure : Sc_1, Sc_3, Sc_5 et Sc_7.

Ce classement est schématisé par des polices et des couleurs de remplissages distinctes dans le tableau 81.

I.3.1.3. Hiérarchisation des scénarii par ordre de criticité

Selon la démarche présentée en partie B, nous devrions uniquement hiérarchiser les scénarii classés à « criticité significative », cependant ici nous hiérarchisons les douze scénarii du mur en béton puisque nous disposons d'un nombre restreint de scénarii et que les seuils permettant de définir les classes de criticité ont été fixés arbitrairement.
La hiérarchisation des scénarii par ordre de criticité nécessite l'évaluation de cette criticité. La criticité d'un scénario est selon notre proposition (*cf.* I.4.2-c de la partie B) le produit de la probabilité d'apparition, de la durée et de la gravité des conséquences de ce scénario pondéré par les masses de croyance associées à ces trois critères, c'est-à-dire :

$$Cr^j = \left(\xi^j\right)^{p\xi^j} \times \left(CDu^j\right)^{pCDu^j} \times \left(G^j\right)^{pG^j} \quad \textbf{[46]}$$

avec : ξ^j : probabilité d'apparition du scénario *j*,
$p\xi^j$: poids associé à la probabilité d'apparition,
CDu^j : critère de durée déduit de la durée de Sc_j,
$pCDu^j$: poids associé au critère de durée,
G^j : gravité du scénario *j*,
pG^j : poids associé à la gravité du scénario *j*,

La probabilité d'apparition et la gravité des scénarii du mur en béton sont récapitulées dans le tableau 81, et le critère de durée s'obtient à partir de la formule suivante (ce critère ramène la durée sur le domaine d'observation sur une échelle [0 ; 1]) :

$$CDu^j = \frac{t_f - moy(\delta Du^j)}{t_f - t_0} \quad \textbf{[47]}$$

avec : δDu_j : domaine de durée du scénario *j*,

t_f : borne de fin de la période d'observation, ici t_f = 160 ans, cette valeur correspond à la date de réalisation du scénario le plus long, elle est déterminée soit à partir des durées obtenues par agrégation des durées des phénomènes au niveau des scénarii soit à partir des durées collectées directement au niveau des scénarii ; ici elle est déduite de la donnée 52 présentée en annexe 15,

t_0 : borne de début de la période d'observation, ici t_0 = 0.

Par exemple, pour le scénario Sc_1 du mur en béton, son domaine de durée est [65 ; 109] ans, la moyenne de cet intervalle est égale à 87 ans et son critère de durée est égal à (160 - 87) / (160 - 0) = 0,863.
Les critères de durée obtenus pour les douze scénarii du mur en béton sont présentés dans le tableau suivant :

	CDu^j
Sc_1	0,863
Sc_2	0,899
Sc_3	0,794

	CDu^j
Sc_4	0,942
Sc_5	0,894
Sc_6	0,909

	CDu^j
Sc_7	0,928
Sc_8	0,944
Sc_9	0,988

	CDu^j
Sc_{10}	0,969
Sc_{11}	0,988
Sc_{12}	0,928

Tableau 83 : Critères de durée des scénarii du mur en béton

Les pondérations des trois critères de criticité sont obtenues en appliquant les équations suivantes, définies au I.4.2-c de la partie B :

$$p\xi^j = \frac{1 - m(\xi^j)}{(1 - m(\xi^j)) + (1 - m(\delta Du^j)) + 0{,}5} \quad \textbf{[48]} \qquad pCdr^j = \frac{1 - m(\delta Du^j)}{(1 - m(\xi^j)) + (1 - m(\delta Du^j)) + 0{,}5} \quad \textbf{[49]}$$

$$pG^j = \frac{0{,}5}{(1 - m(\xi^j)) + (1 - m(\delta Du^j)) + 0{,}5} \quad \textbf{[50]}$$

avec :

$m(\xi^j)$: masse de croyance associée à la probabilité d'apparition du scénario Sc_j. Ici, nous avons estimé ces probabilités d'apparition (*cf.* I.2.2.3) par conséquent leur masse de croyance est prise égal à 0,5, comme proposé au I.4.2-c de la partie B ;

$m(\delta Du^j)$: masse de croyance associée au domaine de durée du scénario *j*,

Par exemple, pour le scénario 1 du mur en béton, la masse de croyance de sa durée ([65 ; 109] ans) est égale à 0,279 et la masse de croyance de sa probabilité d'apparition est prise égale à 0,5, par conséquent :

- $p\xi^1 = (1 - 0{,}5)/((1 - 0{,}5) + (1 - 0{,}279) + 0{,}5) = 0{,}291$,
- $pCDu^1 = (1 - 0{,}279)/((1 - 0{,}5) + (1 - 0{,}279) + 0{,}5) = 0{,}419$,
- $pG^1 = 0{,}5/((1 - 0{,}5) + (1 - 0{,}279) + 0{,}5) = 0{,}291$.

Les pondérations des probabilités d'apparition, des critères de durée et des gravités des douze scénarii du mur en béton sont regroupées dans le tableau suivant :

	$p\xi^j$	$pCDu^j$	pG^j		$p\xi^j$	$pCDu^j$	pG^j		$p\xi^j$	$pCDu^j$	pG^j
Sc_1	0,291	0,419	0,291	Sc_5	0,299	0,403	0,299	Sc_9	0,294	0,412	0,294
Sc_2	0,334	0,333	0,334	Sc_6	0,294	0,412	0,294	Sc_{10}	0,286	0,429	0,286
Sc_3	0,291	0,419	0,291	Sc_7	0,299	0,403	0,299	Sc_{11}	0,286	0,429	0,286
Sc_4	0,336	0,328	0,336	Sc_8	0,294	0,412	0,294	Sc_{12}	0,380	0,241	0,380

Tableau 84 : Pondérations des critères de criticité des scénarii du mur en béton

Nous calculons ensuite la criticité de tous les scénarii du mur en béton, à partir de l'équation [46]. Les criticités obtenues pour les douze scénarii du mur en béton sont présentées dans le tableau suivant :

	ξ^j	$m_c(\xi^j)$	$p\xi^j$	δDu^j	$m_c(\delta Du^j)$	CDu^j	$pCDu^j$	G^j	pG^j	Cr^j
Sc_1	0,220	0,500	0,291	[65 ; 109] ans	0,279	0,863	0,419	0,711	0,291	0,548
Sc_2	0,397	0,500	0,334	[37 ; 72,5] ans	0,501	0,899	0,333	0,711	0,334	0,631
Sc_3	0,103	0,500	0,291	[47 ; 113] ans	0,279	0,794	0,419	0,715	0,291	0,425
Sc_4	0,338	0,500	0,336	[19 ; 37,5] ans	0,512	0,942	0,328	0,714	0,336	0,608
Sc_5	0,220	0,500	0,299	[89 ; 123] ans	0,325	0,894	0,403	0,711	0,299	0,549
Sc_6	0,257	0,500	0,294	[48 ; 77] ans	0,299	0,909	0,412	0,711	0,294	0,583
Sc_7	0,220	0,500	0,299	[78 ; 101] ans	0,325	0,928	0,403	0,715	0,299	0,559
Sc_8	0,327	0,500	0,294	[37 ; 55] ans	0,299	0,944	0,412	0,714	0,294	0,637
Sc_9	0,400	0,500	0,294	[23 ; 27] ans	0,299	0,988	0,412	0,727	0,294	0,692
Sc_{10}	0,700	0,500	0,286	[5 ; 15] ans	0,250	0,969	0,429	0,621	0,286	0,778
Sc_{11}	0,490	0,500	0,286	[23 ; 27] ans	0,250	0,988	0,429	0,722	0,286	0,739
Sc_{12}	0,397	0,500	0,380	[20 ; 43] ans	0,683	0,928	0,241	0,587	0,380	0,565

Tableau 85 : Récapitulatif des attributs utiles au calcul de la criticité et criticité des scénarii du mur en béton

La hiérarchisation des scénarii du mur en béton par ordre de criticité, la valeur de criticité la plus forte correspondant au scénario le plus critique, déduite des valeurs de criticité obtenues pour ces scénarii (*cf.* tableau 85) est présentée à la figure 78. Nous mentionnons également sur cette figure le classement de ces scénarii par classes de criticité, établi précédemment.

Criticité croissante ↑

Sc_{10}	Scénario de salissure de la structure en béton	Criticité majeure
Sc_{11}	Scénario d'efflorescence de la structure en béton	Criticité significative
Sc_9	Scénario de faïençage de la structure en béton	Criticité significative
Sc_8	Scénario de chute de morceaux de la structure en béton	Criticité significative
Sc_2	Scénario de chute de morceaux de la structure en béton	Criticité significative
Sc_4	Scénario de chute de morceaux de la structure en béton	Criticité significative
Sc_6	Scénario de chute de morceaux de la structure en béton	Criticité significative
Sc_{12}	Scénario d'écrasement du complexe isolant	Criticité significative
Sc_7	Scénario de chute de morceaux de la structure en béton	Criticité mineure
Sc_5	Scénario de chute de morceaux de la structure en béton	Criticité mineure
Sc_1	Scénario de chute de morceaux de la structure en béton	Criticité mineure
Sc_3	Scénario de chute de morceaux de la structure en béton	Criticité mineure

Figure 78 : Hiérarchisation des scénarii par ordre de criticité et parallèle avec le classement de ces scénarii

Les gravités de ces douze scénarii étant toutes relativement proches (comprises entre 0,587 et 0,727 – *cf.* tableau 80), la hiérarchisation présentée ci-dessus dépend donc essentiellement de la variation des probabilités et des durées de ces scénarii.

I.3.2. Analyse quantitative de la criticité du mur en briques

Objectif de ce paragraphe

Il s'agit de présenter les résultats de l'analyse quantitative de la criticité du mur en briques et de les comparer à ceux du mur en béton.

Hypothèses pour le système étudié

Nous formulons les mêmes hypothèses (environnement, conséquences des scénarii, fonctions prises en compte) que celles faites lors de l'analyse qualitative de ce produit (*cf.* I.1.3).

I.3.2.1. Classement et hiérarchisation des scénarii du mur en briques

Les scénarii de dégradation du mur en briques que nous classons puis hiérarchisons par ordre de criticité sont ceux identifiés lors de l'analyse qualitative de ce mur (*cf.* I.1.3) ; ces scénarii sont détaillés à la figure 65 et sont rappelés à la figure suivante :

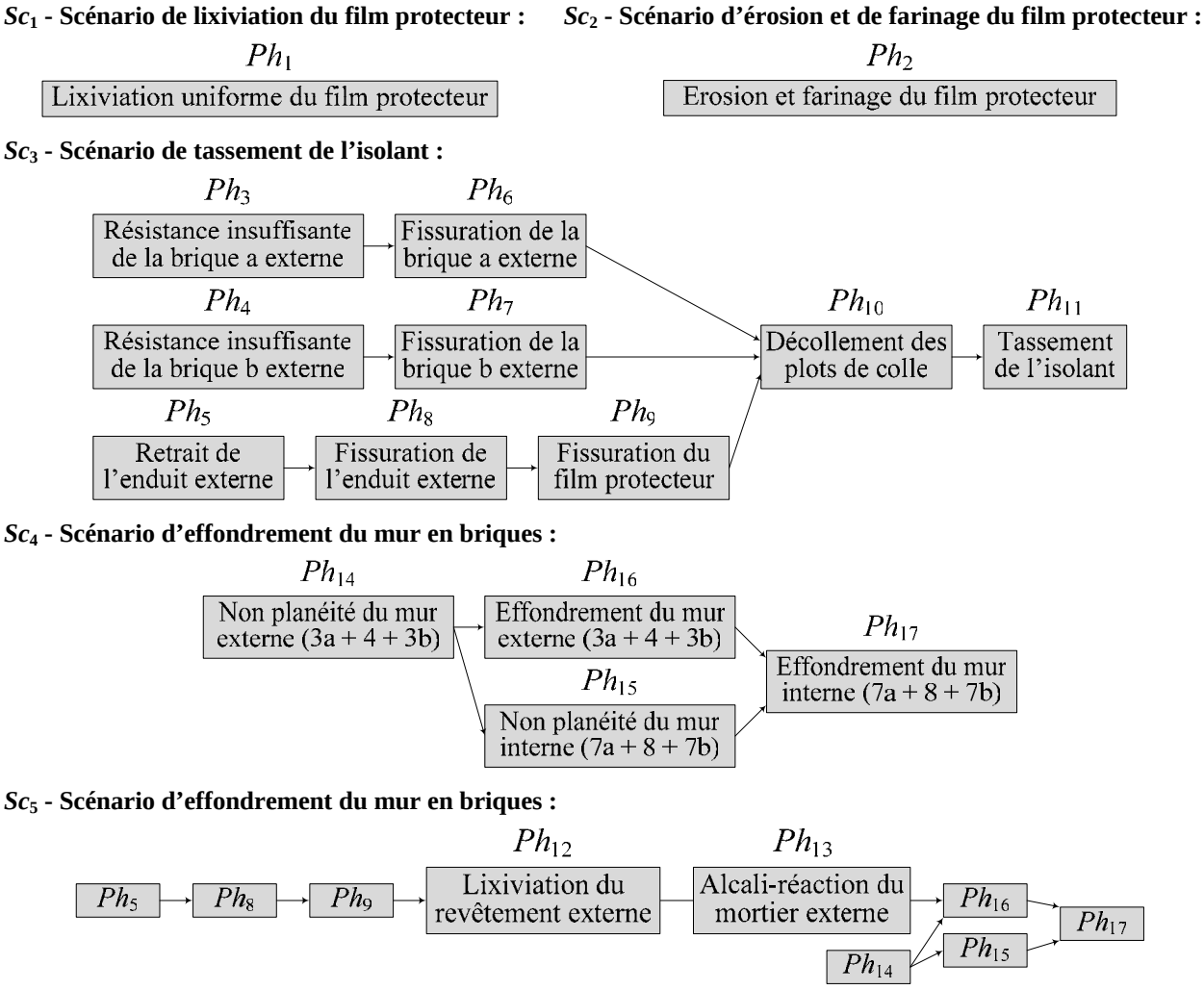


Figure 79 : Scénarii du mur en briques étudiés

La synthèse des résultats de l'analyse quantitative temporelle de ce mur (durée des scénarii Du^j, masse de croyance associée $m_c(Du^j)$, probabilité d'apparition des scénarii ξ^j, masse associée $m_c(\xi^j)$) de l'estimation de la gravité G^j de ces scénarii, de l'évaluation du critère de durée CDu^j, du calcul des poids associés à ces trois critères de criticité (durée $pCDu^j$,

probabilité d'apparition $p\xi^j$ et gravité pG^j), ainsi que la valeur de la criticité Cr^j résultante est présentée dans le tableau 86. Ces résultats permettent à la fois de classer les scénarii par ordre de criticité puis de les hiérarchiser.

	ξ^j	$m(\xi^j)$	$p\xi^j$	δDu^j	$m(\delta Du^j)$	CDu^j	$pCDu^j$	G^j	pG^j	Cr^j
Sc_1	0,700	0,500	0,286	[4 ; 14] ans	0,250	0,900	0,429	0,590	0,286	0,742
Sc_2	0,700	0,500	0,286	[4 ; 14] ans	0,250	0,900	0,429	0,610	0,286	0,750
Sc_3	0,118	0,500	0,286	[21 ; 59] ans	0,250	0,556	0,429	0,900	0,286	0,410
Sc_4	0,354	0,500	0,286	[0 ; 10] ans	0,250	0,944	0,429	0,860	0,286	0,695
Sc_5	0,136	0,500	0,286	[43 ; 99] ans	0,250	0,211	0,429	0,840	0,286	0,276

Tableau 86 : Récapitulatif des attributs utiles au calcul de la criticité et criticité des scénarii du mur en briques

Les évaluations permettant d'obtenir ces résultats sont développées en annexe 17.

Pour pouvoir comparer par la suite (*cf.* I.3.3), les résultats de l'analyse de la criticité de ce mur en briques avec ceux du mur en béton, nous considérons les mêmes seuils de criticité ; ils sont rappelés dans le tableau suivant :

	Criticité majeure	**Seuils 1**	Criticité significative	**Seuils 2**	Criticité mineure
Probabilité d'apparition	$\xi^j \geq 0{,}6$	**0,6**	$0{,}6 > \xi^j \geq 0{,}25$	**0,25**	$0{,}25 > \xi^j$
Durée	$moy(\delta Du^j) \leq 15$	**15**	$15 < moy(\delta Du^j) \leq 70$	**70**	$70 < moy(\delta Du^j)$
Gravité	$G^j \geq 0{,}6$	**0,6**	$0{,}6 > G^j \geq 0{,}5$	**0,5**	$0{,}5 > G^j$

Tableau 87 : Seuils de criticité pour le classement des scénarii du mur en briques

Le classement des scénarii du mur en briques obtenu selon ces seuils de criticité est le suivant :

- criticité majeure : Sc_2,
- criticité significative : Sc_1, Sc_4,
- criticité mineure : Sc_3, Sc_5.

La hiérarchisation de ces scénarii par ordre de criticité, ainsi que la correspondance avec le classement par classes de criticité obtenu ci-dessus sont représentées à la figure suivante :

Criticité croissante ↑

Sc_2	Scénario d'érosion et de farinage du film protecteur	Criticité majeure
Sc_1	Scénario de lixiviation du film protecteur	Criticité significative
Sc_4	Scénario d'effondrement du mur en briques	Criticité significative
Sc_3	Scénario de tassement de l'isolant	Criticité mineure
Sc_5	Scénario d'effondrement du mur en briques	Criticité mineure

Figure 80 : Hiérarchisation et classement des scénarii du mur en briques par ordre de criticité

I.3.3. Comparaison des résultats des analyses de criticité des deux murs

Pour pouvoir comparer les résultats des analyses de criticité du mur en béton et du mur en briques, nous rappelons sur une même figure (*cf.* figure 81) le classement (fond gris clair → criticité majeure ; fond gris mi-foncé → criticité significative ; fond gris foncé → criticité mineure) et la hiérarchisation par ordre de criticité des scénarii de ces deux murs.

Mur en béton				Mur en briques		
Salissure de la structure	Sc_{10}	0,778				
				0,750	Sc_2	Erosion et de farinage du film protecteur
				0,742	Sc_1	Lixiviation du film protecteur
Efflorescence de la structure	Sc_{11}	0,739				
				0,695	Sc_4	Effondrement du mur en briques
Faïençage de la structure	Sc_9	0,692				
Chute de morceaux de la structure	Sc_8	0,637				
Chute de morceaux de la structure	Sc_2	0,631				
Chute de morceaux de la structure	Sc_4	0,608				
Chute de morceaux de la structure	Sc_6	0,583				
Ecrasement du complexe isolant	Sc_{12}	0,565				
Chute de morceaux de la structure	Sc_7	0,559				
Chute de morceaux de la structure	Sc_5	0,549				
Chute de morceaux de la structure	Sc_1	0,548				
Chute de morceaux de la structure	Sc_3	0,425				
				0,410	Sc_3	Tassement de l'isolant
				0,276	Sc_5	Effondrement du mur en briques

Figure 81 : Hiérarchisation et classement par ordre de criticité des scénarii des deux murs

Nous constatons que les scénarii les plus critiques (criticité majeure) pour les deux applications sont ceux qui ont une durée relativement courte, une probabilité élevée et qui affectent les composants directement en contact avec le milieu extérieur alors que leur gravité est relativement faible par rapport aux autres scénarii.
Le fait que ces scénarii soient directement en contact avec le milieu extérieur explique en partie le fait qu'ils aient une durée relativement courte, par rapport au scénario de tassement de l'isolant pour le mur en briques qui requiert plus de temps pour que l'humidité s'infiltre jusqu'à la profondeur de cet isolant.
La constatation que des scénarii ayant une gravité élevée sont classés en « criticité mineure » comme par exemple le scénario Sc_3 de tassement de l'isolant du mur en briques ($G^3 = 0{,}9$), s'explique par le fait que les valeurs de gravité de l'ensemble des scénarii sont élevées et proches les unes des autres (varient de 0,587 à 0,727 pour le mur en béton et de 0,59 à 0,9 pour le mur en briques), par conséquent l'impact de la gravité sur la valeur de la criticité est relativement faible.

Nous constatons que l'ordre de criticité des scénarii est globalement semblable pour les deux murs, et distinguons quatre groupes de scénarii cités par ordre de criticité décroissante :

- les scénarii dégradant l'intégrité des composants externes des murs en contact avec l'extérieur (scénarii de salissure, d'érosion et de farinage, de lixiviation, d'efflorescence et de faïençage),
- les scénarii entraînant une décohésion partielle ou totale des éléments porteurs des murs, c'est-à-dire la structure en béton et les façades externes et internes en briques (scénarii d'effondrement et de chute de morceaux),
- les scénarii affectant les isolations thermique et acoustique (scénarii d'écrasement et de tassement),
- les scénarii entraînant une décohésion partielle ou totale des éléments porteurs des murs et incluant un nombre important de phénomènes ayant des probabilités d'apparition faibles (scénarii de chute de morceaux et d'effondrement).

I.4. Applications de l'analyse quantitative des performances

Nous présentons successivement dans ce paragraphe, les analyses quantitatives des performances du mur en béton, du mur en briques, puis la comparaison des résultats obtenus pour ces deux murs et enfin une comparaison de notre approche avec celle proposée par le BEST du Politecnico di Milano, c'est-à-dire la Performance Limits Method.

I.4.1. Analyse quantitative des performances du mur en béton

Objectif de ce paragraphe

Il s'agit de présenter les différentes étapes de l'analyse quantitative des performances (obtention des fonctions de niveau de performance associées à chaque phénomène, définition des combinaisons entre fonctions, obtention du profil multi-performance, détermination de la cinétique d'évolution du profil multi-performance) sur l'application du mur en béton à partir des scénarii indépendants obtenus lors de l'analyse quantitative temporelle (*cf.* I.2.1).

Hypothèses pour le système étudié

Elles sont identiques à celles formulées pour l'application de l'analyse quantitative de la criticité (*cf.* I.3.1).

I.4.1.1. Obtention des fonctions de niveau de performance associées à chaque phénomène

Cette étape de l'analyse quantitative des performances consiste à relier les niveaux de performance des fonctions du produit aux états de dégradation des phénomènes du mur en béton.

Selon la démarche proposée en partie B de ce mémoire, l'analyse quantitative des performances est menée pour les scénarii indépendants les plus critiques (« criticité majeure ») ; cependant, nous utiliserons ici tous les scénarii indépendants identifiés à l'issue de l'analyse quantitative temporelle, puisque leur nombre est restreint ; il s'agit des scénarii :

- Sc_2 : « chute de morceaux » de la structure en béton,
- Sc_9 : « faïençage » de la structure en béton,
- Sc_{10} : « salissure » de la structure en béton,
- Sc_{11} : « efflorescence » de la structure en béton,
- Sc_{12} : « écrasement » du complexe isolant.

L'obtention des fonctions de niveau de performance associées à chaque phénomène se déroule, selon la démarche présentée au I.5.2 de la partie B, en quatre phases :

1. détermination des caractéristiques intrinsèques permettant de quantifier les niveaux de performance des fonctions du mur ; elles sont proposées dans le tableau 88,
2. évaluation ou estimation des fonctions reliant les valeurs des caractéristiques intrinsèques aux états de dégradation des phénomènes du mur,
3. évaluation ou estimation des fonctions reliant les niveaux de performance des fonctions du mur aux valeurs des caractéristiques intrinsèques,
4. déduction (des phases 3 et 4) des fonctions reliant les niveaux de performance aux états de dégradation des phénomènes du mur ; elles sont synthétisées au tableau 89.

Dans la mesure où nous n'avons pas collecté de données de performance permettant d'évaluer les caractéristiques intrinsèques et les fonctions reliant ces caractéristiques intrinsèques aux niveaux de performance :

- nous donnons les noms des caractéristiques intrinsèques (*cf.* tableau 88) à titre d'exemples,

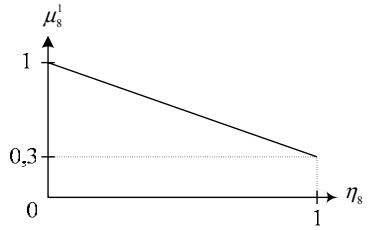
- nous ne présentons pas les phases 2 et 3 citées ci-dessus,
- nous déclarons (*cf.* tableau 89) les fonctions reliant les niveaux de performance aux états de dégradation des phénomènes.

Remarque : les fonctions de niveaux de performances présentées dans ce paragraphe sont déclarées, sans être validées, dans le but d'illustrer la démarche de quantification des performances ; par conséquent les résultats obtenus au cours et à l'issue de cette application sont peu fiables.

Fonction		*Caractéristiques intrinsèques* du mur en béton
Fp_1	Stopper	Perméabilité
Fp_2	Absorber	Résistances thermique et acoustique
Fp_3	Résister mécaniquement	Résistances mécaniques (résistance à la compression, à la traction, …)
Fs_4	Etre intègre	Dégradations physico-chimiques
Fp_5	Etre conforme	Satisfaction esthétique

Tableau 88 :* Caractéristiques intrinsèques *du mur en béton associées à ses fonctions

Pour chacun des couples {fonction F_k ; phénomène Ph_i} des scénarii étudiés, nous déclarons une fonction mathématique reliant le niveau de performance de F_k à l'état de dégradation η_i de Ph_i ; ces fonctions sont synthétisées sous forme arithmétique (et graphique pour {Fp_1 ; Ph_8}) dans le tableau 89.

Fp_1 : Stopper Ph_8 : Carbonatation béton μ_8^1 : niveau de performance de la fonction Fp_1 affectée par le phénomène Ph_8 η_8 : état de dégradation de Ph_8	$\mu_8^1 = 1 - 0{,}7 \times \eta_8$		
Fp_1 : Stopper Ph_9 : Corrosion treillis soudé	$\mu_9^1 = 1 - 0{,}02 \times \eta_9$	Fs_4 : Etre intègre Ph_9 : Corrosion treillis soudé	$\mu_8^4 = 1 - \eta_9$
Fp_1 : Stopper Ph_{15} : Carbonatation béton	$\mu_{15}^1 = 1 - 0{,}7 \times \eta_{15}$	Fs_4 : Etre intègre Ph_{15} : Carbonatation béton	$\mu_8^4 = 1 - \eta_{15}$
Fp_2 : Absorber Ph_7 : Enrobage insuffisant	$\mu_7^2 = 1 - 0{,}04 \times \eta_7$	Fs_4 : Etre intègre Ph_{21} : Lixiviation film protecteur	$\mu_8^4 = 1 - \eta_{21}$
Fp_2 : Absorber Ph_9 : Corrosion treillis soudé	$\mu_9^2 = 1 - 0{,}01 \times \eta_9$	Fs_4 : Etre intègre Ph_{23} : Ecrasement isolant	$\mu_8^4 = 1 - \eta_{23}$
Fp_2 : Absorber Ph_{23} : Ecrasement isolant	$\mu_{23}^2 = 1 - 0{,}2 \times \eta_{23}$	Fs_4 : Etre intègre Ph_{24} : Ecrasement doublage	$\mu_8^4 = 1 - \eta_{24}$
Fp_2 : Absorber Ph_{24} : Ecrasement doublage	$\mu_{24}^2 = 1 - 0{,}1 \times \eta_{24}$	Fs_4 : Etre intègre Ph_{25} : Ecrasement plots de colle	$\mu_8^4 = 1 - \eta_{25}$
Fp_2 : Absorber Ph_{25} : Ecrasement plots de colle	$\mu_{25}^2 = 1 - 0{,}15 \times \eta_{25}$	Fp_5 : Etre conforme Ph_7 : Enrobage insuffisant	$\mu_7^5 = 1 - 0{,}4 \times \eta_7$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_8 : Carbonatation béton	$\mu_8^3 = 1 - 0{,}2 \times \eta_8$	Fp_5 : Etre conforme Ph_9 : Corrosion treillis soudé	$\mu_9^5 = 1 - 0{,}3 \times \eta_9$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_9 : Corrosion treillis soudé	$\mu_9^3 = 1 - 0{,}4 \times \eta_9$	Fp_5 : Etre conforme Ph_{19} : Faïençage béton	$\mu_{19}^5 = 1 - 0{,}2 \times \eta_{19}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{15} : Carbonatation béton	$\mu_{15}^3 = 1 - 0{,}2 \times \eta_{15}$	Fp_5 : Etre conforme Ph_{20} : Salissure film protecteur	$\mu_{20}^5 = 1 - 0{,}2 \times \eta_{20}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{21} : Lixiviation film protecteur	$\mu_{21}^3 = 1 - 0{,}2 \times \eta_{21}$	Fp_5 : Etre conforme Ph_{22} : Efflorescence béton	$\mu_{22}^5 = 1 - 0{,}2 \times \eta_{22}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{23} : Ecrasement isolant	$\mu_{23}^3 = 1 - 0{,}2 \times \eta_{23}$	Fp_5 : Etre conforme Ph_{23} : Ecrasement isolant	$\mu_{23}^5 = 1 - 0{,}3 \times \eta_{23}$

Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{24} : Ecrasement doublage	$\mu_{24}^{3} = 1 - 0{,}2 \times \eta_{24}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{25} : Ecrasement plots de colle	$\mu_{25}^{3} = 1 - 0{,}2 \times \eta_{25}$
Fs_4 : Etre intègre Ph_8 : Carbonatation béton	$\mu_{8}^{4} = 1 - \eta_{8}$

Fp_5 : Etre conforme Ph_{24} : Ecrasement doublage	$\mu_{24}^{5} = 1 - 0{,}3 \times \eta_{24}$
Fp_5 : Etre conforme Ph_{25} : Ecrasement plots de colle	$\mu_{25}^{5} = 1 - 0{,}3 \times \eta_{25}$

Tableau 89 : Niveaux de performance associés aux couples {fonction ; phénomène} du mur en béton

I.4.1.2. Définition des combinaisons entre fonctions

Nous n'illustrons pas ici cette étape, puisque nous n'avons pas identifié, pour cette application, de combinaison de fonctions qui avait une signification physique.
Nous nous intéresserons donc, dans les paragraphes suivants, uniquement à l'évolution des performances des cinq fonctions du mur prises indépendamment les unes des autres.

I.4.1.3. Obtention du profil multi-performance

L'obtention du profil multi-performance à une date fixée consiste à définir les niveaux de performances des cinq fonctions du mur en béton à partir :

- des fonctions de niveaux de performance associées à chaque couple $\{F_k\ ;\ Ph_i\}$ définies précédemment,
- des états de dégradation des phénomènes correspondant à cette date et des durées d'atteinte de ces états de dégradation, obtenus à l'issue de l'analyse temporelle.

Les différentes étapes permettant d'aboutir à cette obtention du profil multi-performance à différentes dates de la vie en œuvre du mur en béton sont illustrées ci-après.

Positionnement des phénomènes sur un axe temporel

Afin de faciliter la sélection des scénarii et phénomènes à prendre en compte lors de l'étape suivante, nous synthétisons graphiquement les résultats de l'analyse temporelle en positionnant sur un même axe temporel, l'instant d'atteinte par les phénomènes de leur taux de transition et la valeur de leur état de dégradation correspondant à ce taux de transition.

Rappel : le taux de transition τ_i^j entre deux phénomènes successifs Ph_i^j et Ph_{i+1}^j correspond à la valeur d'état de dégradation de Ph_i^j pour laquelle Ph_{i+1}^j peut démarrer.

A la figure 82, pour chaque phénomène nous indiquons la ou les fonction(s) du produit qu'il affecte et la valeur de son état de dégradation correspondant à son taux de transition. Chaque phénomène est positionné, dans un souci de simplification de la représentation à la valeur moyenne de son intervalle de durée de vie.

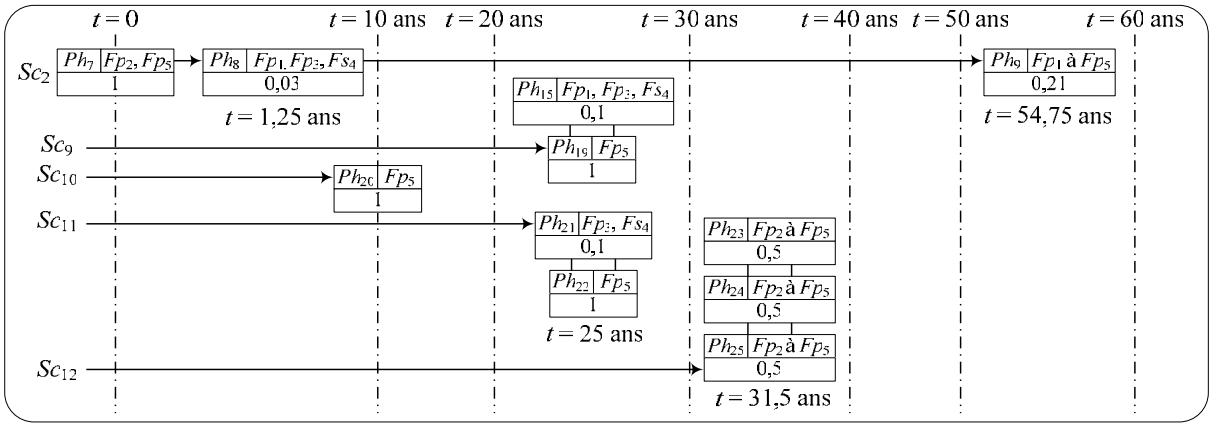


Figure 82 : Positionnement des phénomènes du mur en béton sur un axe temporel

Sélection des scénarii à la date fixée

Il s'agit ici d'identifier les scénarii, puis les phénomènes qui affectent à une date fixée, les fonctions du mur en béton.

A la date $t = 0$, seul le phénomène d'enrobage insuffisant (Ph_7) du scénario Sc_2 (qui a eu lieu lors de la mise en œuvre du produit, c'est-à-dire à $t < 0$) a une influence sur les niveaux de performance des fonctions du mur. Pour $t > 0$, tous les scénarii ont une influence sur ces niveaux de performance.

Recherche des états de dégradation des phénomènes à la date fixée

Nous illustrons cette première étape à partir du phénomène de carbonatation du béton (Ph_8) appartenant au scénario « chute de morceaux » de béton (Sc_2) vis-à-vis de la fonction « stopper » (Fp_1) à la date $t = 10$ ans.

Nous savons que la durée de vie de ce phénomène est [1 ; 1,5] ans et qu'elle correspond au temps d'atteinte du treillis soudé par le front de carbonatation lorsque l'enrobage est insuffisant, c'est-à-dire lorsque cet enrobage a une épaisseur de 0,5 cm.

Cette durée de vie correspond au temps de carbonatation jusqu'à ce que la corrosion se propage, ce qui signifie que le front de carbonatation continue à progresser dans la structure après ce laps de temps ; par conséquent, l'état de dégradation du phénomène de carbonatation η_8 est inférieur à 1 (valeur correspondant à la fin du phénomène).

En réutilisant les modèles de carbonatation nous ayant permis d'obtenir cette durée de vie, nous en déduisons qu'à la date $t = 10$ ans, la profondeur de carbonatation est de 0,67 cm.

Nous considérons que $\eta_8 = 1$ lorsque le front de carbonatation a traversé toute la structure en béton, en faisant une règle de trois par rapport à la profondeur de carbonatation, nous obtenons : $\eta_8(20\text{ cm}) = 1$ et $\eta_8(0{,}67\text{ cm}) = 0{,}04$.

Déduction des niveaux de performance des {F_k ; Ph_i}

Cette étape consiste à définir pour chaque couple {fonction F_k ; phénomène Ph_i} le niveau de performance μ_i^k de la fonction F_k affectée par le phénomène Ph_i.

Exemple de l'impact d'un phénomène sur un niveau de performance d'une fonction

Nous illustrons cette étape à l'aide de l'exemple précédent, c'est-à-dire à partir du couple {Fp_1 ; Ph_8} à la date $t = 10$ ans ; nous avons :

- état de dégradation : $\eta_8 = 0{,}04$;
- fonction de niveau de performance : $\mu_8^1 = 1 - 0{,}7 \times \eta_8$.

Par conséquent : $\mu_8^1(t = 10\text{ ans}) = 1 - 0{,}7 \times 0{,}04 = 0{,}97$.

Exemple de l'impact d'une concomitance de phénomènes sur un niveau de performance d'une fonction

L'état de dégradation du phénomène Ph_9 du scénario Sc_2, indiqué à la figure 82, permet de déterminer un niveau de performance μ_9^k (k variant ici de p_1 à p_5). A cette date le phénomène Ph_8 n'est pas terminé, c'est-à-dire qu'il continue à diminuer les niveaux de performance des fonctions Fp_1, Fp_3 et Fs_4 ; de plus, le phénomène Ph_7 a affecté les fonctions Fp_2 et Fp_5 dès le début de la vie en œuvre du produit ($t = 0$). Par conséquent, les niveaux de performances des fonctions Fp_1 à Fp_5 à la date $t = 60$ ans, pour le scénario Sc_2 dépendent de ces trois phénomènes.

A la date t = 60 ans, pour le scénario Sc_2, nous avons :

- l'effet du phénomène Ph_9 (considéré indépendamment du scénario Sc_2, c'est-à-dire sans prendre en compte l'effet des autres phénomènes) sur les fonctions Fp_1 à Fp_5 : $\mu_9^1 = 0{,}99$, $\mu_9^2 = 0{,}998$, $\mu_9^3 = 0{,}9$, $\mu_9^4 = 0{,}76$ et $\mu_9^5 = 0{,}93$;
- l'effet du phénomène Ph_8 sur les fonctions Fp_1, Fp_3 et Fs_4 : $\mu_8^1 = 0{,}83$, $\mu_8^3 = 0{,}96$ et $\mu_8^4 = 0{,}75$;
- l'effet du phénomène Ph_7 sur les fonctions Fp_2 et Fp_5 : $\mu_7^2 = 0{,}96$ et $\mu_7^5 = 0{,}6$.

Par conséquent, à cette date et pour le scénario Sc_2, les niveaux de performance des fonctions Fp_1 à Fp_5, sont tels que :

- $\mu_{8,9}^1 = 0{,}83 - (1 - 0{,}99) = 0{,}82$;
- $\mu_{7,9}^2 = 0{,}96 - (1 - 0{,}998) = 0{,}96$;
- $\mu_{8,9}^3 = 0{,}96 - (1 - 0{,}9) = 0{,}86$;
- $\mu_{8,9}^4 = 0{,}76 - (1 - 0{,}75) = 0{,}53$;
- $\mu_{7,9}^5 = 0{,}6 - (1 - 0{,}93) = 0{,}53$.

L'ensemble des niveaux de performance obtenus pour tous les couples $\{F_k ; Ph_i\}$ aux dates t = 10, 20, 30, 40, 50 et 60 ans est présenté dans le tableau suivant :

Sc_j	Ph_i	F_k	μ_i^k (10 ans)	μ_i^k (20 ans)	μ_i^k (30 ans)	μ_i^k (40 ans)	μ_i^k (50 ans)	μ_i^k (60 ans)
Sc_2	Ph_7	Fp_2	**0,96**	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
		Fp_5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	Ph_8	Fp_1	0,97	0,94	0,92	0,89	0,86	0,83
		Fp_3	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96
		Fs_4	0,96	0,92	0,88	0,84	0,8	0,76
	$Ph_{8 \text{ et } 9}$	Fp_1	-	-	-	-	-	0,82
	$Ph_{7 \text{ et } 9}$	Fp_2	-	-	-	-	-	0,96
	$Ph_{8 \text{ et } 9}$	Fp_3	-	-	-	-	-	0,86
	$Ph_{8 \text{ et } 9}$	Fs_4	-	-	-	-	-	0,53
	$Ph_{7 \text{ et } 9}$	Fp_5	-	-	-	-	-	0,53
Sc_9	Ph_{15}	Fp_1	0,97	0,94	0,92	0,89	0,86	0,83
		Fp_3	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95
Sc_9	Ph_{15}	Fs_4	0,96	0,92	0,88	0,84	0,8	0,76
	Ph_{19}	Fp_5	0,92	0,84	0,8	0,8	0,8	0,8
Sc_{10}	Ph_{20}	Fp_5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Sc_{11}	Ph_{21}	Fp_3	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95
		Fs_4	0,97	0,92	0,88	0,84	0,8	0,76
	Ph_{22}	Fp_5	0,92	0,84	0,8	0,8	0,8	0,8
Sc_{12}	Ph_{23}	Fp_2	**1**	1	1	0,87	0,84	0,81
		Fp_3	1	1	1	0,87	0,84	0,81
		Fs_4	1	1	1	0,37	0,21	0,05
		Fp_5	1	1	1	0,81	0,76	0,72
	Ph_{24}	Fp_2	**1**	1	1	0,94	0,92	0,91
		Fp_3	1	1	1	0,87	0,84	0,81
		Fs_4	1	1	1	0,37	0,21	0,05
		Fp_5	1	1	1	0,81	0,76	0,72
	Ph_{25}	Fp_2	**1**	1	1	0,85	0,85	0,85

Sc_{12}	Ph_{25}	Fp_3	1	1	1	0,8	0,8	0,8
		Fs_4	1	1	1	0	0	0
		Fp_5	1	1	1	0,7	0,7	0,7

Tableau 90 : Niveaux de performance des couples {F_k ; Ph_i} du mur en béton à t = 10, 20, 30, 40, 50 et 60 ans

Déduction des niveaux de performance des {F_k}

Le niveau de performance μ^k d'une fonction F_k à une date t fixée est déduit des niveaux de performances μ_i^k des couples {F_k ; Ph_i} ; il est donné par la formule suivante :

$$\mu^k = \min\left(\mu_i^k\right) \mid \forall i \ \{F_k\,;Ph_i\} \neq \phi \quad \textbf{[51]}$$

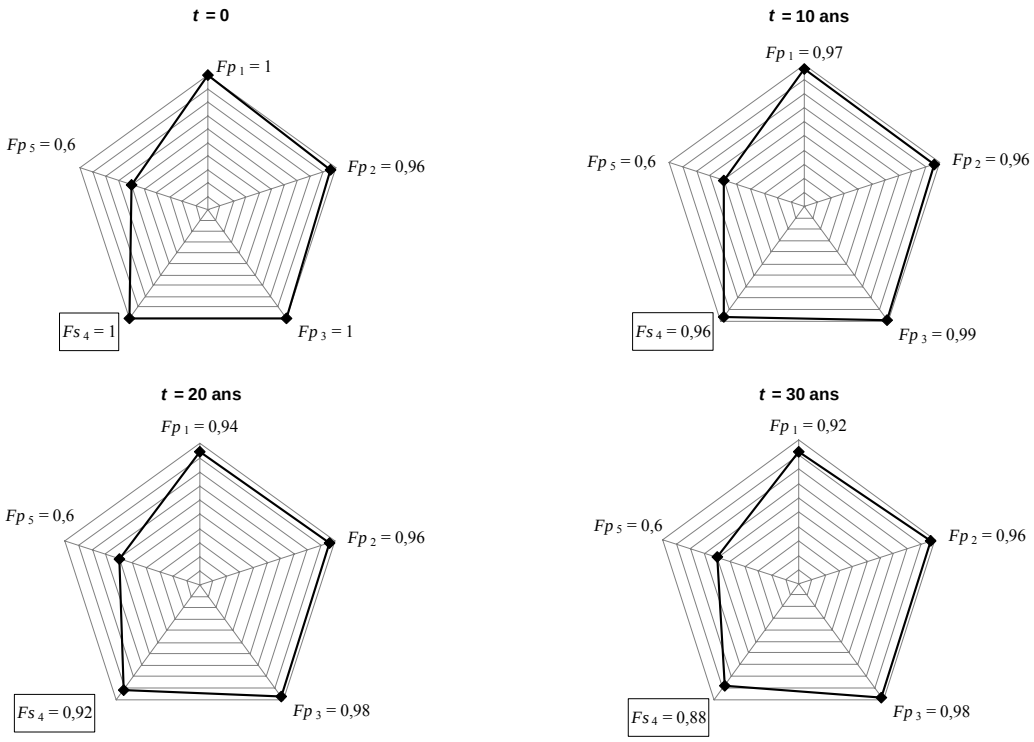
Par exemple, pour la fonction Fp_2 à la date t = 10 ans, nous avons (en gras au tableau 90) :

- $\mu_7^2(t = 10 \text{ ans}) = 0{,}96$;
- $\mu_{23}^2(t = 10 \text{ ans}) = 1$;
- $\mu_{24}^2(t = 10 \text{ ans}) = 1$;
- $\mu_{25}^2(t = 10 \text{ ans}) = 1$.

Par conséquent $\mu^2(t = 10 \text{ ans}) = 0{,}96$.

Tracé du profil multi-performance

Cette étape consiste à synthétiser sous forme d'une représentation radar normalisée, l'ensemble des niveaux de performance des fonctions obtenus à une date fixée. La figure suivante regroupe les profils multi-performances obtenus aux dates 0, 10, 20, 30, 40, 50 et 60 ans.



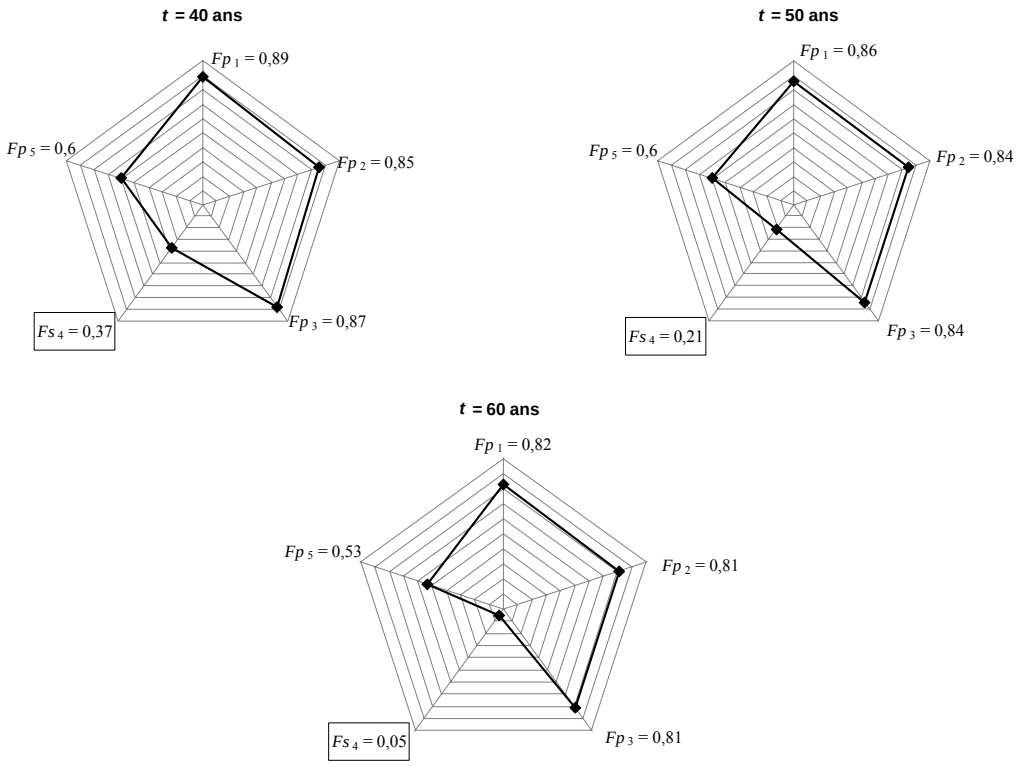


Figure 83 : Profils multi-performances du mur en béton à différents instants de sa vie en œuvre

Rappel : les fonctions Fp_1, Fp_2, Fp_3 et Fp_5 sont des fonctions principales et la fonction Fs_4 est une fonction secondaire ; par conséquent la défaillance d'au moins une fonction principale entraînera la défaillance du mur en béton, alors que la défaillance d'une fonction secondaire n'entraînera pas la défaillance de ce mur.

Dans la mesure où nous n'avons pas défini, pour l'instant, de seuils de défaillance, par défaut le mur sera défaillant lorsqu'au moins le niveau de performance d'une de ses fonctions principales sera égal à 0 (ce qui correspond à une ruine compète du mur). Nous constatons d'après les résultats présentés à la figure 83, que ce mur n'est pas défaillant sur l'intervalle [0 ; 60] ans.

Si l'on considère, par exemple, l'ensemble des seuils de défaillance $\{\mu^1_{seuil} = 0{,}55$; $\mu^2_{seuil} = 0{,}55$; $\mu^3_{seuil} = 0{,}55$; $\mu^5_{seuil} = 0{,}55\}$, alors le mur en béton est défaillant entre 50 et 60 ans.

I.4.1.4. Détermination de la cinétique d'évolution du profil multi-performance

L'indicateur de cinétique d'évolution du profil multi-performance permet d'apprécier l'augmentation ou la diminution de la cinétique d'évolution d'une même performance à intervalle régulier et de comparer les cinétiques d'évolution de plusieurs performances ; cet indicateur est donné par la formule suivante (*cf.* IV.4.2 de la partie B) :

$$Ic\mu^k = \frac{\left|\mu^k(t_i + \Delta t) - \mu^k(t_i)\right|}{|\Delta t|} \quad \textbf{[52]}$$

Les indicateurs de cinétique d'évolution du profil multi-performance du mur en béton obtenus à t = 10, 20, 30, 40, 50 et 60 ans, sont regroupés dans le tableau suivant :

	$Ic\mu^k$ (10 ans)	$Ic\mu^k$ (20 ans)	$Ic\mu^k$ (30 ans)	$Ic\mu^k$ (40 ans)	$Ic\mu^k$ (50 ans)	$Ic\mu^k$ (60 ans)
Fp_1	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,004
Fp_2	0	0	0	0,011	0,001	0,003
Fp_3	0,001	0,001	0	0,011	0,003	0,003
Fs_4	0,004	0,004	0,004	0,051	0,016	0,016
Fp_5	0	0	0	0	0	0,007

Tableau 91 : Indicateur de cinétique d'évolution du profil multi-performance du mur en béton

Cinétique d'une même performance

La fonction Fp_1 (stopper) est quasiment constante sur [0 ; 60] ans, puisque son niveau de performance est uniquement affecté par le phénomène de carbonatation, dont l'état de dégradation diminue de manière quasi constante après 10 ans.

Les cinétiques des fonctions Fp_2 (absorber), Fp_3 (résister mécaniquement) et Fs_4 (être intègre) sont constantes (ou nulle) jusqu'à 30 ans puis augmente brusquement de 30 à 40 ans, ce qui est dû à l'écrasement du complexe isolant qui intervient entre ces deux dates.

La cinétique de la fonction Fp_5 n'augmente qu'entre 50 et 60 ans, c'est-à-dire lorsque la corrosion des aciers (Ph_9) démarre. En effet, l'impact de ce phénomène vient s'ajouter à l'impact de l'enrobage insuffisant (Ph_7), alors que de 0 à 50 ans, l'impact de cet enrobage insuffisant représente une importante non conformité aux réglementations. Cet impact est très important par rapport à la dégradation du niveau de satisfaction esthétique engendrée par les phénomènes de salissures (Ph_{19}) d'efflorescence (Ph_{20}) et d'écrasement du complexe isolant (Ph_{23} à Ph_{25}).

Comparaison des cinétiques de l'ensemble des performances

La cinétique d'évolution de la fonction Fs_4 (être intègre) est nettement supérieure aux cinétiques des autres fonctions, puisque cette fonction est très fortement affectée par la majorité des phénomènes du mur en béton.

I.4.2. Analyse quantitative des performances du mur en briques

Objectif de ce paragraphe

Il s'agit de présenter les résultats de l'analyse quantitative des performances du mur en briques (en considérant les scénarii indépendants obtenus à l'issue de l'analyse quantitative temporelle (*cf.* annexe 17), de comparer ces résultats avec ceux obtenus pour le mur en béton et de comparer la démarche présentée avec celle proposée par le Département BEST du Politecnico di Milano, c'est-à-dire la Performance Limits Method.

Hypothèses pour le système étudié

Elles sont identiques à celles formulées pour l'application de l'analyse quantitative de la criticité (*cf.* I.3.2).

I.4.2.1. Profils multi-performances du mur en briques

La démarche d'obtention des profils multi-performances du mur en briques à différentes dates de sa vie en œuvre est semblable à celle du mur en béton, décrite précédemment (*cf.* I.4.1) ; c'est la raison pour laquelle nous présentons ici uniquement les principaux résultats :

- le positionnement des phénomènes du mur en briques sur l'axe temporel,
- les profils multi-performances obtenus aux dates t = 10, 20, 30, 40, 50 et 60 ans.

Les fonctions de niveaux de performance associées à chaque couple $\{F_k ; Ph_i\}$ permettant d'obtenir ces profils multi-performances sont regroupées en annexe 18.

Remarque : comme pour le mur en béton, les fonctions de niveau de performances utilisées pour obtenir les profils multi-performances sont déclarées, sans être validées ; par conséquent les résultats obtenus au cours et à l'issue de cette application sont peu fiables.

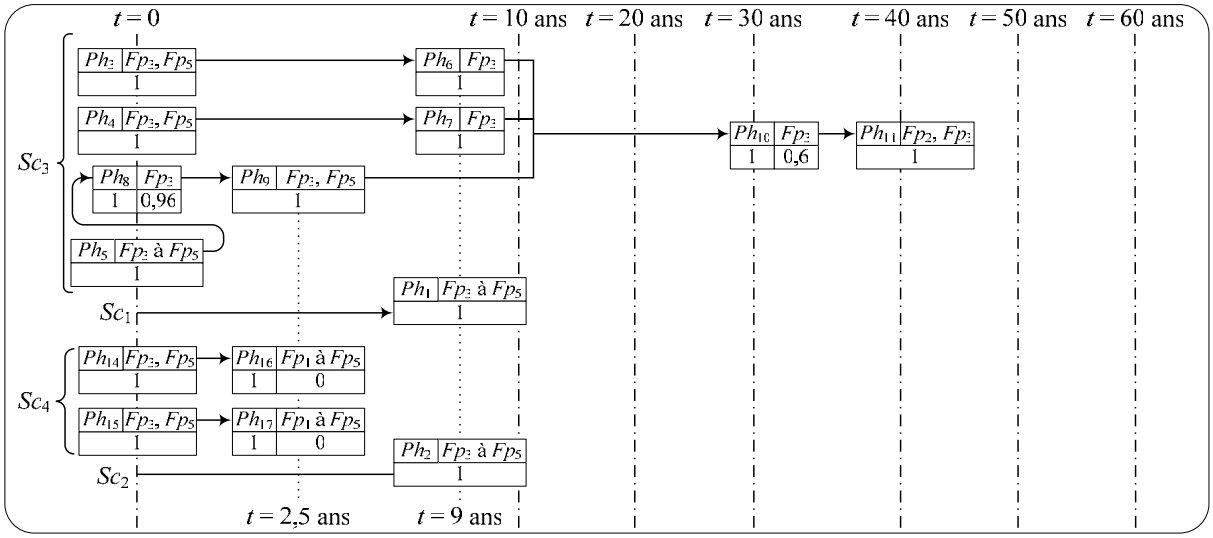


Figure 84 : Positionnement des phénomènes du mur en brique sur un axe temporel

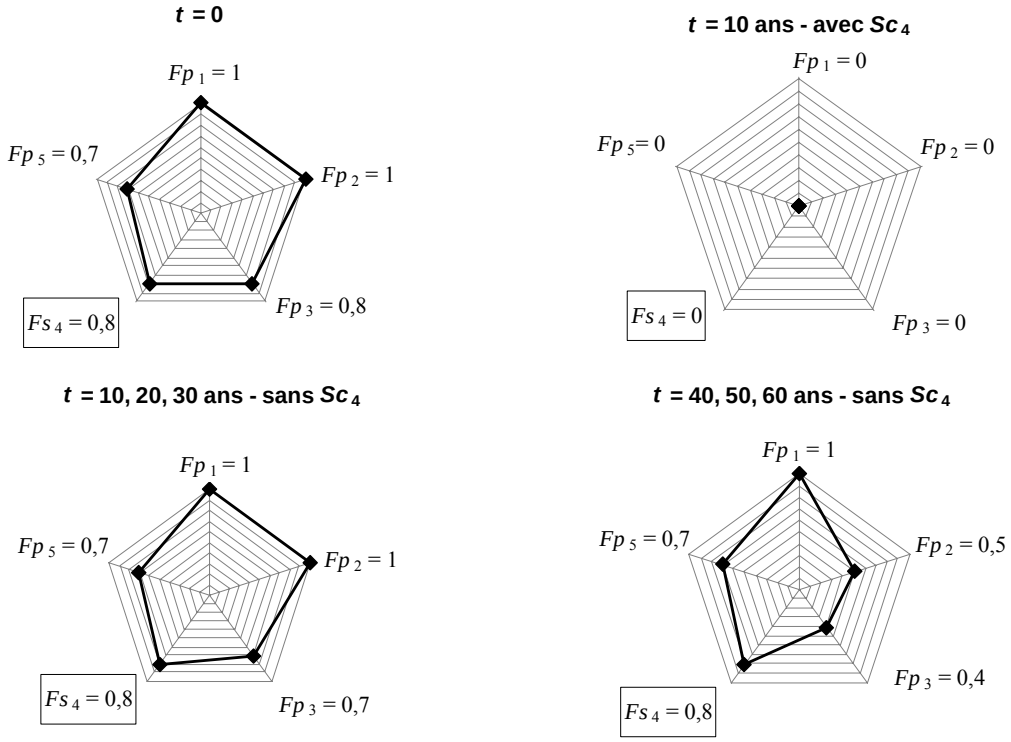


Figure 85 : Profils multi-performances du mur en briques à différents instants de sa vie en œuvre

En considérant le scénario Sc_4 d'effondrement des façades en briques (briques externes + mortier externe et briques internes + mortier interne), nous obtenons une défaillance complète, du mur en briques avant 10 ans, c'est-à-dire pour toutes ses fonctions principales et la combinaison de fonctions.

Pour que ce scénario d'effondrement démarre et se termine durant la période d'observation de l'étude, il faut que la non planéité du support des façades en briques soit importante et qu'il y ait un impact d'intensité « très importante ». Si l'on considère que ce phénomène et cette cause ne sont pas présents, nous obtenons les profils multi-performances à différents instants de la vie en œuvre du mur présentés à la figure 85, notés « sans Sc_4 ».

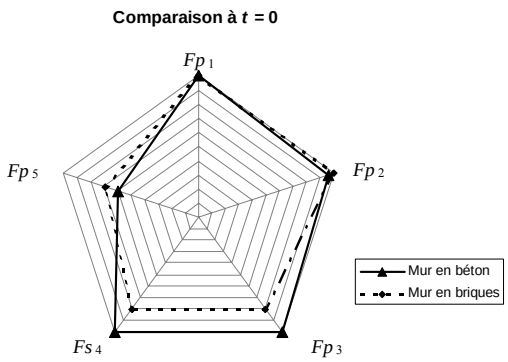
Avec cette hypothèse, nous constatons que les cinétiques d'évolution des fonctions « absorber » (Fp_2) et « résister mécaniquement » (Fp_3) augmentent fortement entre 30 et 40 ans, ce qui est lié à la réalisation complète des phénomènes de décollement des plots de colle (Ph_{10}) et de tassement de l'isolant (Ph_{11}) – qui peut entraîner une sollicitation mécanique horizontale au pied des façades en briques tendant à les écarter.

I.4.3. Comparaison des résultats des analyses de performance des deux murs

Nous comparons ici les profils multi-performances du mur en béton (*cf.* figure 83) et du mur en briques (*cf.* figure 85), aux dates t = 0, 10, 20, 30, 40, 50 et 60 ans, sans considérer le scénario d'effondrement des façades en briques (Sc4) du mur en briques, puisque la quantification des performances du mur en béton n'intègre pas de scénarii de ruine de ce mur.

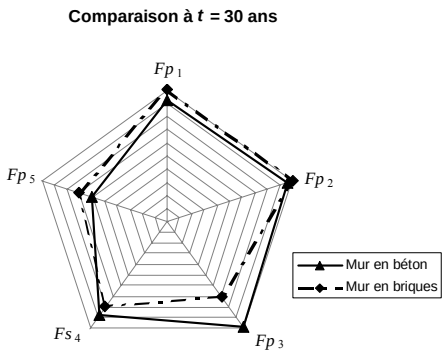
Profils à t = 0

Le mur en briques, à l'issue de la phase de réalisation, a globalement des niveaux de performance plus faibles que ceux du mur en béton, excepté pour la fonction « Etre conforme » (Fp_5).
Ce résultat s'explique par le fait que nous avons identifié plus d'erreurs de processus possibles pour le mur en briques que pour le mur en béton et ces erreurs impactent sur l'ensemble des fonctions.



Profils à t = 10, 20 et 30 ans

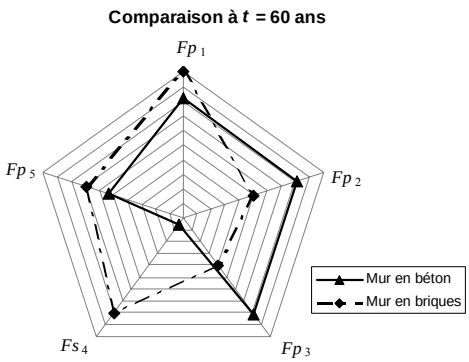
Entre 0 et 30 ans, les niveaux de performance du mur en béton et du mur en briques sont proches pour les fonctions « stopper » (Fp_1), « absorber » (Fp_2), « être intègre » (Fs_4) et « être conforme » (Fp_5). Par contre le niveau de performance de la fonction « résister mécaniquement » (Fp_3) continue a être plus faible pour le mur en briques, ce qui s'explique par le fait que les phénomènes identifiés pour le mur en béton affectent peu la fonction de résistance mécanique.



Profils à t = 40, 50 et 60 ans

De 40 à 60 ans, les niveaux de performance du mur en briques sont supérieurs à ceux du mur en béton pour les fonctions « Stopper » (Fp_1), « Etre intègre » (Fs_4) et « Etre conforme » et ces niveaux sont inférieurs pour les fonctions « Absorber » (Fp_2) et « Résister mécaniquement » (Fp_3).

On pourrait en conclure que le mur en briques est moins résistant mécaniquement et assure moins bien le confort thermique et acoustique des occupants si les phénomènes de dégradation étaient similaires. Ce n'est pas le cas ici, dans la mesure où nous avons décrit le scénario de tassement de l'isolant dû à une faible résistance des façades en briques dès la mise en œuvre pour le mur en briques alors que nous avons considéré que le béton avait une résistance mécanique normale à l'issue de la phase de mise en œuvre et que son complexe isolant est peu sensible à l'humidité.



I.4.4. Comparaison de l'analyse quantitative des performances et de la Performance Limits Method

L'analyse quantitative des performances que nous proposons et la Performance Limits Method, proposée par le Département BEST du Politecnico di Milano et présentée au II.4.3 de la partie A ont :

- *le même objectif*, c'est-à-dire obtenir la durée de vie d'un produit en intégrant leurs performances fonctionnelles,
- des *approches distinctes*, elles sont comparées ci-après,
- une *complémentarité possible*, elle est décrite ci-après.

Approches distinctes

Les principales étapes de ces deux méthodes sont présentées en parallèle ci-après afin d'identifier les différences et les similitudes.

Rappel : η_i désigne l'état de dégradation d'un phénomène Ph_i, μ_i^k correspond au niveau de performance d'une fonction F_k affectée par un phénomène Ph_i et κ_i est une caractéristique intrinsèque associée à un phénomène Ph_i.

Notre proposition	Performance Limits Method
Etape 1 : Identifier les phénomènes et les scénarii de dégradation (analyse qualitative).	**Etape 1 :** Détermination du phénomène entraînant la défaillance.
Etape 2 : Evaluer la durée et la probabilité d'apparition des phénomènes et scénarii (analyse quantitative temporelle) permettant d'obtenir toutes les $\eta_i = f(t)$.	**Etape 2** : Détermination des fonctions $\mu_i^k = f(\kappa_i)$ pour chaque composant à partir des modèles physiques existants les plus appropriés.
Etape 3 : Evaluation des $\kappa_i = f(\eta_i)$ et des $\mu_i^k = f(\kappa_i)$ permettant de déduire les $\mu_i^k = f(t)$ pour tous les couples $\{F_k\,;\,Ph_i\}$ par collecte et unification de données multi-sources ou par déclaration (telle que présentée précédemment).	**Etape 3** : Détermination des valeurs limites des μ_i^k (pour chaque composant considéré indépendamment les uns des autres) pour lesquelles le produit est défaillant, par consultation des réglementations ou à dire d'experts.

Etape 4 : Agrégation au niveau du produit en considérant tous les scénarii afin d'obtenir les profils multi-performances à différents instants de la vie en œuvre du produit.

Etape 5 : Définition des seuils de défaillance.

Etape 6 : Déduction de la durée de vie, elle correspond au profil multi-performance pour lequel ou moins l'un des niveaux de performance des fonctions principales ou des combinaisons de fonctions (incluant une fonction principale) est inférieur aux seuils de défaillance.

Etape 4 : Identification du composant entraînant la défaillance, c'est-à-dire celui qui atteint le plus rapidement les valeurs limites des μ_i^k

Etape 5 : Détermination de la durée pour laquelle la valeur des κ_i correspondant à la valeur limite (de défaillance) de μ_i^k par expérimentations en exposition de courte et de longue durée du couple {composant ; phénomène} entraînant la défaillance. Cette durée correspond à la durée de vie du produit.

Similitudes entre les deux approches

Les deux approches utilisent l'évaluation de $\mu_i^k = f(\kappa_i)$ et cherchent à déterminer les seuils de défaillance des fonctions d'un produit par consultation des réglementations ou à dire d'experts.

Différences entre les deux approches

Nous avons une approche multi-performance (nous considérons l'ensemble des fonctions d'un produit et leur combinaison) multi-phénomène (nous considérons tous les phénomènes pouvant affecter les niveaux de performance des fonctions du produit) multi-composant (nous considérons l'impact de tous les composants sur les performances du produit) et multi-source (nous unifions l'ensemble des données de $\kappa_i = f(\eta_i)$ et $\mu_i^k = f(\kappa_i)$ disponibles) contrairement à la Performance Limites Method.

Complémentarité possible : utilisation des données du BEST

Le BEST possède une forte connaissance des modèles permettant de déterminer les $\mu_i^k = f(\kappa_i)$ et de nombreux résultats d'expérimentations en exposition de courte et de longue durée qui seraient très utiles à l'application de notre approche.

Chapitre II : Analyse critique

L'objectif de ce chapitre est de faire une analyse critique de la méthodologie et des applications proposées dans ce mémoire ; cette analyse critique est organisée autour de trois thèmes :

- **comparaison des applications (II.1)** : il s'agit à la fois de comparer les différentes démarches adoptées pour étudier qualitativement puis quantitativement les quatre applications, de compléter les interprétations des résultats obtenus au premier chapitre de cette partie C et de donner des pistes d'amélioration ;
- **synthèse des hypothèses (II.2)** : des hypothèses ont été formulées lors de la description de la méthodologie et lors du déroulement des applications ; nous les avons soit reprises de travaux de recherche précédents soit introduites nous mêmes. Nous allons ici lister ces hypothèses, en préciser l'origine et présenter les perspectives qui permettraient de les valider ;
- **limites et perspectives méthodologiques et applicatives (II.3)** : les limites et perspectives introduites par la méthodologie elle-même ont été présentées au chapitre V de la partie B, il s'agit donc ici de développer les limites et perspectives de la méthodologie et des applications révélées par les applications.

II.1. Comparaison des applications

II.1.1. Comparaison des démarches d'application

Le tableau 92 récapitule les différentes démarches d'application adoptées au chapitre précédent.

	Fenêtre fixe	Mur en béton	Mur en briques	Complexe fenêtre + mur béton
Analyse qualitative	Consultation d'un groupe d'experts pour la description du produit et la recherche de ses phénomènes de dégradation.	Consultation d'un groupe d'expert pour la description du produit et utilisation de la base de données « phénomènes » pour l'identification de ses phénomènes de dégradation.	Consultation de groupes d'expert (français et italiens) pour la description du produit et la recherche de ses phénomènes de dégradation.	Réutilisation des analyses qualitatives de la fenêtre et du mur en béton.
Analyse temporelle	Evaluation de la durée de vie de la fenêtre par unification et agrégation de données temporelles multi-sources associées aux phénomènes et à l'ensemble des scénarii. Estimation des probabilités d'apparition.	Evaluation de la durée de vie d'un scénario par unification et agrégation de données temporelles multi-sources associées aux phénomènes et à l'ensemble des scénarii. Estimation des probabilités d'apparition.	Evaluation de la durée de vie du mur en briques par unification de données multi-sources associées à l'ensemble des scénarii. Déclaration des cinétiques de dégradation des phénomènes et déduction des durées de vie des scénarii de ce mur pour obtenir les données utiles à l'analyse de la criticité.	
Analyse de la criticité		Estimation des critères de criticité, des seuils de criticité puis classement et hiérarchisation des scénarii par classes et ordre de criticité.		
Analyse des performances		Déclaration de fonctions de niveaux de performance et évaluation des profils multi-performances aux dates t = 0, 10, 20, 30, 40, 50 et 60 ans.		

Tableau 92 : Synthèse des démarches d'application

Comparaison des analyses qualitatives
L'analyse du système (analyse structurelle, analyse fonctionnelle et analyse du processus) est nécessairement menée avec des personnes qui connaissent le produit étudié ; par contre, l'AMDE peut être appliquée en utilisant uniquement la base de données « phénomènes », si cette base de données contient toutes les informations phénoménologiques associées aux matériaux et composants constitutifs du produit étudié, ce qui va dans le sens de l'outil informatique d'AMDE assistée par ordinateur, développé par le CSTB, et détaillé au III.3 de cette partie C.

Comparaison des analyses temporelles
La stratégie de quantification temporelle dépend des données disponibles et du niveau de précision attendue vis-à-vis des résultats.

La stratégie de quantification « idéale » (vis-à-vis de la fiabilité du résultat) consiste à évaluer les durées de vie et les probabilités d'apparition associées au point objectif à partir de données collectées à ce même point objectif.
Si l'on ne dispose pas de données temporelles au point objectif, ou que le résultat obtenu n'est pas satisfaisant, on doit rechercher des données à des points connexes (par exemple, au niveau du scénario si le point objectif est le niveau de l'ensemble des scénarii), puis les unifier et les agréger au niveau du point objectif.
Si l'on ne dispose pas de données de probabilités d'apparition alors on doit les estimer.

La non satisfaction d'un résultat peut provenir des causes suivantes :
- la qualité des données collectées n'est pas suffisante,
- la largeur de l'intervalle de durée de vie résultant est trop importante,
- les indicateurs de qualité du résultat sont trop faibles.

La non satisfaction d'un résultat dépend également de sa destination :
- une durée de vie fournie sous forme d'un large intervalle avec des indicateurs de qualité élevés peut être satisfaisante si les valeurs de cet intervalle sont supérieures à une valeur cible ; par exemple on peut vouloir évaluer la durée de vie d'un produit pour savoir si elle est supérieure à la garantie décennale ;
- une durée de vie fournie sous forme d'un intervalle restreint avec des indicateurs de qualité élevés sera préférable à une durée de vie avec un large intervalle et les mêmes indicateurs de qualité si elle est destinée à prévoir la planification des opérations de maintenance, ou à avoir une approche en coût global d'un bâtiment.

Comparaison des analyses de la criticité et des performances
Nous avons utilisé la même démarche d'application pour les deux types de murs, puisque nous n'avons proposé qu'une démarche possible pour l'analyse de la criticité, et que nous ne disposions pas de données de performances (caractéristiques intrinsèques et fonctions de niveaux de performance) pour mener l'analyse des performances de ces deux applications.

II.1.2. Interprétation des résultats des applications

Résultats des analyses qualitatives
Nous avons proposé deux niveaux de granularité (scénarii génériques et scénarii élémentaires) pour la description qualitative des scénarii de dégradation des applications de la fenêtre fixe et des deux murs et uniquement le niveau de granularité « générique » pour les scénarii du complexe fenêtre et mur en béton.

Le fait de rester au niveau « générique » permet de présenter l'ensemble des scénarii affectant un produit de construction ou un assemblage de produits ; ce niveau de description est donc suffisant si l'on souhaite avoir une connaissance globale de leur comportement.
Il est par contre nécessaire d'aller au niveau des scénarii élémentaires si l'on souhaite avoir une connaissance plus approfondie d'un scénario précis ou si l'on souhaite quantifier temporellement ce scénario à partir de données collectées aux niveaux de ses phénomènes constitutifs.
Nous constatons, cependant, qu'il n'est pas aisé de proposer des règles permettant de définir le niveau de granularité de description le mieux adapté, généralisables à l'ensemble des entités constructives. Par exemple, nous avons décrit finement le scénario « chute de morceaux » du mur en béton lors de l'analyse qualitative et nous avons dû regrouper plusieurs de ses phénomènes (corrosion des aciers, fissuration des aciers, formation de sels gonflants, éclatement du béton et chute de morceaux) pour pouvoir le quantifier temporellement.

Résultats des analyses quantitatives temporelles

Qualité des données collectées
Les données collectées pour les différentes applications ont des qualités proches les unes des autres ; ceci s'explique par le fait que nous avons utilisé des données les plus fiables possibles et les plus proches possibles de nos cas d'étude puisque notre objectif était d'illustrer la méthodologie et non d'évaluer sa robustesse.
L'évaluation de la robustesse de notre méthodologie constitue une perspective à ces travaux de thèse (*cf.* II.3 de ce chapitre).

Stratégie d'assemblage des données
Les données temporelles que nous avons collectées sont généralement conflictuelles ; par exemple, les données de carbonatation du béton et de corrosion des aciers, sont issues de recherches indépendantes fournissant des données ponctuelles distinctes les unes des autres, ce qui est une cause de conflit.
Les stratégies d'assemblage des données que nous avons utilisé résultent d'un compromis, nous avons cherché les données regroupant le maximum de masse et engendrant un conflit relativement faible.
D'autres stratégies sont possibles et il serait intéressant d'évaluer la sensibilité de ces résultats à ces stratégies.

Relation entre indicateurs de qualité des données et stratégie de quantification temporelle
Selon l'objectif de quantification temporelle recherché, les indicateurs de qualité des durées de vie et des probabilités d'apparition nous permettent de décider si le résultat a une qualité suffisante.

Par exemple, pour l'application de la fenêtre nous avons obtenu :

- durée de vie de la fenêtre : [23 ; 27] ans,
- *Bel* ([23 ; 27]) = 0,21,
- *Pl* ([23 ; 27]) = 0,91,
- *P* ([23 ; 27]) = 0,45.

L'intervalle de durée de vie est relativement restreint, la probabilité de Smets est plutôt élevée et l'écart entre croyance et plausibilité est élevé, par conséquent :

- si l'objectif de cette étude est de savoir si la fenêtre ne sera pas dégradée, par exemple, pendant les 15 premières années, alors ce résultat est satisfaisant et suffisant,
- si l'objectif est, en se plaçant à $t = 20$ ans, de planifier l'année de remplacement de la fenêtre, alors ce résultat n'est pas suffisant et il faut poursuivre l'étude.

La poursuite de l'étude consiste à rechercher des données temporelles aux points d'évaluation où les indicateurs de qualité sont les plus faibles en commençant par les points d'évaluation les plus proches du point objectif.

Résultats des analyses quantitatives de la criticité

Ils ont été discutés et comparés au premier chapitre de la partie C de ce mémoire.

Résultats des analyses quantitatives des performances

Les résultats obtenus pour les analyses quantitatives des performances des deux murs sont basés sur des données de niveaux de performances déclarées, il est donc essentiel de poursuivre le travail sur l'analyse des niveaux de performance afin d'obtenir des résultats fiables et exploitables.

II.2. Synthèse des hypothèses

Nous avons fait des hypothèses au cours de la présentation de la méthodologie et lors de l'illustration de cette méthodologie par des applications. Nous les récapitulons ici afin d'en préciser l'origine, l'utilité ; les perspectives de validation de ces hypothèses sont développées au II.3 de ce chapitre.

Hypothèses méthodologiques liées à l'analyse quantitative temporelle

H1 : évaluation de la qualité des données (cf. I.2.3-c de la partie B)

Les critères d'évaluation de la qualité des données et les valeurs prises par ces critères sont pour partie repris des travaux de thèse de [LAI, 00] et pour partie proposés par nous même.
Cette grille nous semble adaptée aux différents types de données que nous manipulons, cependant le nombre important de critères est susceptible de compenser des notes faibles de certains critères, ce qui est préjudiciable pour la fiabilité des résultats.

H2 : indépendance des phénomènes (cf. I.3.2-d de la partie B)

Nous faisons l'hypothèse que les phénomènes de dégradation sont indépendants en terme de probabilité, afin de simplifier la formulation du problème et obtenir les probabilités d'apparition des scénarii constitués de ces phénomènes.
Un travail académique pourrait être mis en place pour tenir compte de ces dépendances.

H3 : grille d'évaluation des classes de cinétique des phénomènes de dégradation (cf. I.3.2-c de la partie B)

La correspondance que nous introduisons entre classes de cinétique et valeurs de cinétique de dégradation des phénomènes, pour l'estimation des probabilités d'apparition de ces phénomènes, peut être qualifiée de « simple bon sens ».

Hypothèses applicatives liées à l'analyse quantitative temporelle

H1 : transformation des données temporelles en sous-ensemble flous (cf. I.2 de la partie C)

Les règles de transformation des données temporelles en sous-ensembles flous que nous avons présentées lors de l'application de la fenêtre, sont basées sur les règles proposées par [LAI, 00] et relèvent aussi de « simple bon sens ».

H2 : masse de croyance d'une donnée unique (cf. I.2 de la partie C)
Lors de la préparation d'une donnée unique vis-à-vis d'un référentiel, pour l'application de la fenêtre, nous avons choisi de retenir l'intervalle de durée qui correspond à une masse de 0,5. Nous retenons cette valeur de masse de croyance puisqu'elle représente une valeur moyenne.

H3 : fusion des données – borne supérieure de l'intervalle d'ignorance (cf. I.2 de la partie C)
Nous prenons la borne supérieure de l'intervalle d'ignorance égale à 1,2 fois la valeur de la durée la plus grande parmi les données à fusionner. Cette hypothèse est issue des travaux de [LAI, 00] et permet d'éviter les divisions par 0 lors du calcul de l'entropie relative d'une donnée.

H4 : fusion des données – seuil de faible cohérence (cf. I.2 de la partie C)
Nous considérons un seuil de faible cohérence d'une année à défaut d'information sur ce sujet.

H5 : fusion des données – seuil de faible conflit (cf. I.2 de la partie C)
En reprenant la valeur proposée par [LAI, 00], nous considérons que le conflit entre données fusionnées est faible s'il est inférieur à 0,2.

H6 : fusion des données – intervalle de durées retenu (cf. I.2 de la partie C)
A l'issue de la fusion de plusieurs données temporelles, nous retenons l'intervalle de durées qui regroupe 80% du consensus et non celui qui regroupe 100% du consensus afin d'avoir une donnée plus informative, c'est-à-dire sous forme d'un intervalle, plutôt qu'une donnée ponctuelle. Nous avons fixé 80 % du consensus puisqu'elle nous semble permettre d'obtenir une largeur d'intervalle appropriée, mais cela aussi peut être l'objet d'une analyse de sensibilité.

Hypothèses méthodologiques liées à l'analyse quantitative de la criticité

H1 : grille d'évaluation de l'impact d'un phénomène sur la robustesse d'un produit (cf. I.4.2-a de la partie B)
Les valeurs de la grille d'évaluation de l'impact d'un phénomène sur la robustesse d'un produit ont été établies selon notre jugement et requièrent d'être validés.

Hypothèses applicatives liées à l'analyse quantitative de la criticité

H1 : grille d'estimation des probabilités d'apparition (cf. I.3 de la partie B)
Les valeurs de la grille d'estimation des probabilités d'apparition permettant de lier l'indicateur de démarrage et l'indicateur de cinétique des phénomènes ont été établies selon notre jugé et nécessitent une validation.

H2 : seuils de criticité (cf. I.3 de la partie B)
Nous avons fixé arbitrairement des seuils de criticité pour l'application de la méthode de classement des scénarii par ordre de criticité au mur en béton et au mur en briques en fonction des valeurs prises par les probabilités d'apparition, les durées et les gravités de ces murs. Ces valeurs nécessitent d'être validées et ne sont pas transposables à tous les types de produits de construction.

Les règles de transformation des données temporelles en sous-ensembles flous que nous avons présentées lors de l'application de la fenêtre, sont basées sur les règles proposées par [LAI, 00] et relèvent aussi de « simple bon sens ».

H2 : masse de croyance d'une donnée unique (cf. I.2 de la partie C)
Lors de la préparation d'une donnée unique vis-à-vis d'un référentiel, pour l'application de la fenêtre, nous avons choisi de retenir l'intervalle de durée qui correspond à une masse de 0,5. Nous retenons cette valeur de masse de croyance puisqu'elle représente une valeur moyenne.

H3 : fusion des données – borne supérieure de l'intervalle d'ignorance (cf. I.2 de la partie C)
Nous prenons la borne supérieure de l'intervalle d'ignorance égale à 1,2 fois la valeur de la durée la plus grande parmi les données à fusionner. Cette hypothèse est issue des travaux de [LAI, 00] et permet d'éviter les divisions par 0 lors du calcul de l'entropie relative d'une donnée.

H4 : fusion des données – seuil de faible cohérence (cf. I.2 de la partie C)
Nous considérons un seuil de faible cohérence d'une année à défaut d'information sur ce sujet.

H5 : fusion des données – seuil de faible conflit (cf. I.2 de la partie C)
En reprenant la valeur proposée par [LAI, 00], nous considérons que le conflit entre données fusionnées est faible s'il est inférieur à 0,2.

H6 : fusion des données – intervalle de durées retenu (cf. I.2 de la partie C)
A l'issue de la fusion de plusieurs données temporelles, nous retenons l'intervalle de durées qui regroupe 80% du consensus et non celui qui regroupe 100% du consensus afin d'avoir une donnée plus informative, c'est-à-dire sous forme d'un intervalle, plutôt qu'une donnée ponctuelle. Nous avons fixé 80 % du consensus puisqu'elle nous semble permettre d'obtenir une largeur d'intervalle appropriée, mais cela aussi peut être l'objet d'une analyse de sensibilité.

Hypothèses méthodologiques liées à l'analyse quantitative de la criticité

H1 : grille d'évaluation de l'impact d'un phénomène sur la robustesse d'un produit (cf. I.4.2-a de la partie B)
Les valeurs de la grille d'évaluation de l'impact d'un phénomène sur la robustesse d'un produit ont été établies selon notre jugement et requièrent d'être validés.

Hypothèses applicatives liées à l'analyse quantitative de la criticité

H1 : grille d'estimation des probabilités d'apparition (cf. I.3 de la partie B)
Les valeurs de la grille d'estimation des probabilités d'apparition permettant de lier l'indicateur de démarrage et l'indicateur de cinétique des phénomènes ont été établies selon notre jugé et nécessitent une validation.

H2 : seuils de criticité (cf. I.3 de la partie B)
Nous avons fixé arbitrairement des seuils de criticité pour l'application de la méthode de classement des scénarii par ordre de criticité au mur en béton et au mur en briques en fonction des valeurs prises par les probabilités d'apparition, les durées et les gravités de ces murs. Ces valeurs nécessitent d'être validées et ne sont pas transposables à tous les types de produits de construction.

II.3. Limites et perspectives méthodologiques et applicatives

L'application de la méthodologie proposée a permis de mettre en évidence ses limites et les perspectives qu'il serait nécessaire d'étudier.

Analyses de sensibilité / de robustesse

Afin de valider la fiabilité des résultats obtenus par cette méthodologie il est essentiel de mener des analyses de sensibilité et de robustesse :

- de la grille d'évaluation de la qualité des données,
- de la méthode d'agrégation des données,
- de la méthode d'estimation des probabilités d'apparition des phénomènes de dégradation,
- de la méthode d'analyse de la criticité des scénarii de dégradation (robustesse des critères de gravité et de leurs grilles d'évaluation, robustesse du produit pondéré pour l'obtention de la criticité, sensibilité des seuils de criticité),
- de la méthode d'évaluation des performances.

Implémentation

L'application de la méthodologie proposée sera d'autant plus efficace et les résultats obtenus d'autant plus fiables que les bases de données « phénomènes », « probabilités d'apparition » et « performances » seront fournies. Cela est un des enjeux des développements à faire au CSTB.

Automatisation

L'application de la méthodologie proposée est très longue à mener, il est donc indispensable de poursuivre les travaux d'automatisation de l'analyse qualitative engagés, d'adapter le logiciel de fusion des données EDIFICE pour qu'il puisse traiter les données (durées, probabilités, caractéristiques intrinsèques et niveaux de performance) manipulées par cette méthodologie, et de développer des outils complémentaires pour l'automatisation complète de cette méthodologie. Ce point est détaillé au III.3 de cette partie.

Utilisation de la méthodologie par rapport à d'autres

La méthodologie propose une approche globale complète de l'évaluation des performances d'un produit en tenant compte des produits en service, des durées, des probabilités d'apparition et de la criticité des scénarii de ces produits, en faisant le lien entre état de dégradation et niveau de performance et en utilisant l'ensemble des données disponibles.

Il s'agit donc d'un outil de recherche puissant par rapport à des approches intégrant uniquement l'un des aspects de cette méthodologie et / ou pouvant être appliqués qu'à des produits spécifiques.

Il s'agit également d'un outil pouvant servir de base pour la normalisation et la certification des produits de construction.

Chapitre III : Développements industriels

Ce chapitre consacré aux développements industriels vise à présenter les perspectives d'implémentation et d'utilisation de la méthodologie proposée dans ce mémoire dans le contexte industriel. Ces perspectives sont regroupées en quatre thèmes :

- **implémentation en conception** (*cf.* III.1) : ce paragraphe présente la manière dont cette méthodologie peut être utilisée en aide à la conception de nouvelles entités constructives, éventuellement innovantes et les développements qu'il reste à mener,
- **implémentation en inspection, maintenance et réparation** (*cf.* III.2) : ce paragraphe développe la façon dont cette méthodologie peut être utilisée en aide à l'inspection, maintenance et réparation des ouvrages en phase de conception ou en vie en œuvre, ainsi que les développements envisagés,
- **développement du logiciel** (*cf.* III.3) : ce paragraphe présente succinctement les logiciels existants et en cours de développement permettant d'automatiser la méthodologie proposée et le cahier des charges fonctionnel associé à cette méthodologie,
- **valorisation industrielle** (*cf.* III.4) : ce paragraphe détaille les utilisations envisageables à court et moyen termes de cette méthodologie par le CSTB.

III.1. Implémentation en conception

Nous distinguons quatre types d'utilisation possibles de la méthodologie proposée (ou de l'une de ces parties) en phase de conception d'un produit :

- l'identification des points sensibles,
- création de fiches d'aide à la mise en œuvre,
- prévision de la durée de vie,
- apports à la communication entre intervenants du domaine du bâtiment.

III.1.1. Identification des points sensibles

La méthodologie proposée permet d'identifier l'ensemble des scénarii de dégradation de tout produit de construction en phase de vie en œuvre dû à leur environnement climatique, d'usage et à leur mise en œuvre, et de les quantifier en durée, en probabilité, en criticité et en performance ; ce qui permet en phase de conception :

- de connaître l'effet d'un composant sur la performance global d'un produit, c'est-à-dire sur la durée de vie de ce produit, sur la performance d'une fonction essentielle attendue par les utilisateurs, … par conséquent le concepteur peut identifier les composants qu'il pourrait améliorer pour optimiser la performance de son produit ;
- de prévoir le comportement d'un produit dans un environnement défini, par conséquent un concepteur peut vérifier si un produit qu'il souhaite commercialiser pour un environnement climatique et d'usage particulier peut maintenir ses performances au cours du temps ;
- de modéliser le comportement d'un composant intégré dans un produit, c'est-à-dire qu'un concepteur souhaitant introduire un composant innovant dans l'un de ses produits peut connaître l'effet de ce nouveau composant sur les autres composants du produit et sur la performance globale du produit ;
- de connaître les conséquences en termes de performance en vie en œuvre des dégradations provoquées en phase de mise en œuvre ; par conséquent le concepteur peut éventuellement envisager des composants supplémentaires ou des prescriptions de mise en œuvre permettant d'éviter que ces dégradations ne se produisent.

Remarque : cette implémentation n'est possible que si nous disposons de suffisamment de données temporelles, de probabilité et de performance pour obtenir des résultats satisfaisants et fiables.

III.1.2. Fiche d'aide à la mise en œuvre

La méthodologie proposée permet de prévoir l'état possible d'un produit de construction, c'est-à-dire son niveau de performance, à l'issue de sa phase de mise en œuvre, cet état pouvant être différent de ce qui avait été prévu lors de la conception. Nous pouvons en effet quantifier l'effet d'une dégradation provoquée lors de cette phase de mise en œuvre.
Il serait alors intéressant d'établir des « fiches d'aide à la mise en œuvre » pour chaque produit ou famille de produits regroupant les défauts de construction les plus préjudiciables pour les performances fonctionnelles du produit pour sa vie en œuvre et les moyens de les éviter.
Il est possible de proposer à très court terme des fiches d'aide à la mise en œuvre des applications présentées dans ce mémoire (fenêtre fixe, mur en béton, mur en briques, complexe mur en béton et fenêtre) en listant les phénomènes identifiés lors de leur analyse qualitative et en proposant des moyens pour les éviter.
A court terme, il est possible d'affiner cette liste de phénomène préjudiciable pour le produit, pour ne retenir que les plus préjudiciables en poursuivant la recherche de données de probabilité d'apparition et de performance pour obtenir des résultats (profils multi-performances à $t = 0$) plus fiables.
Pour pouvoir établir ces fiches, par familles de produits, il est nécessaire de poursuivre ces travaux de thèse en :

- identifiant les phénomènes provoqués lors de la phase de mise en œuvre qui sont récurant pour chaque famille de produit,
- recherchant les données (durées, probabilités, performances) permettant de quantifier l'effet de ces phénomènes sur les performances de ces familles de produits,
- listant les moyens de les éviter.

III.1.3. Prévision de la durée de vie

La méthodologie proposée permet d'obtenir la durée de vie d'un produit de construction, la confiance qu'il peut accorder à ce résultat (masse de croyance) et le profil multi-performance associé pour un environnement connu, c'est-à-dire que l'on connaît la, les ou la combinaison de fonctions qui ont conduit à la défaillance du produit et les raisons (phénomène(s) et composant(s) associés) de cette défaillance.
Il s'agit donc d'une somme d'information précieuse pour le concepteur qui peut mieux apprécier si le produit qu'il développe satisfera pleinement les attentes des utilisateurs de son produit en terme de pérennité des performances.

III.1.4. Apports à la communication entre intervenants du bâtiment

Une meilleure connaissance des niveaux de performance prévus des produits de construction dans des environnements climatiques et d'usages envisagés permettra au concepteur de valoriser davantage la pérennité des performances de ses produits de construction auprès des entrepreneurs, des assureurs et des gestionnaires de patrimoine.

III.2. Implémentation en inspection, maintenance et réparation

La méthodologie proposée (ou l'une de ses parties) peut être utilisée de trois manières en phase d'inspection, maintenance et réparation des produits de construction :

- création de fiche d'aide au suivi des produits en vie en œuvre,
- aide au diagnostic et à la réparation,
- aide à l'enseignement.

Nous détaillerons ensuite, les perspectives de développement de cette méthodologie nécessaires pour qu'elle puisse être une aide à la planification des opérations de maintenance.

III.2.1. Fiche d'aide au suivi des produits en vie en œuvre

En suivant la même idée que pour les fiches d'aide à la mise en œuvre (*cf.* III.1.2), ces fiches d'aide au suivi des produits ou des familles de produits de construction en vie en œuvre pourraient regrouper :

- une description structurelle et fonctionnelle du produit (issue de l'analyse qualitative), pour avoir une connaissance précise du produit mis en œuvre,
- un ensemble de profils multi-performances à différents instants de la vie en œuvre de ce produit (issus de l'analyse quantitative des performances) correspondant à un environnement climatique et d'usage envisagé le plus réaliste possible,
- un ensemble d'indicateur visuel ou mesurable avec peu d'équipements permettant de comparer l'état (niveaux de performance) réel du produit avec les profils multi-performances schématisés sur cette fiche,
- les scénarii de dégradation les plus critiques (issus de l'analyse de la criticité) et les moyens de les éviter ou au moins de les minimiser.

Ces fiches à destination des gestionnaires de patrimoines et des occupants permettraient aux gestionnaires d'avoir un outil simple de suivi de l'état de leurs patrimoines et permettraient aux occupants d'avoir une meilleure connaissance de l'environnement bâti qui les entoure et les manières de favoriser la pérennité des performances de cet environnement.

A très court terme, il est possible d'établir cette fiche d'aide au suivi des produits en vie en œuvre pour les applications présentées dans ce mémoire ; elle regrouperait la description structurelle et fonctionnelle, les profils multi-performances et les scénarii de dégradation les plus critiques.
A court terme, il serait possible d'affiner les résultats des profils multi-performances de ces applications en poursuivant la recherche de données de probabilité et de performance et d'identifier les indicateurs permettant de comparer l'état réel du produit avec ces profils.

A plus long terme, il est envisageable d'établir ces fiches, par familles de produits, en :

- recherchant une granularité de description structurelle et fonctionnelle permettant une représentation générique de chaque famille de produits,
- identifiant les phénomènes et scénarii, dus à l'environnement climatique et d'usage, récurant pour chaque famille de produits,
- recherchant les données (durées, probabilités, performances) permettant de quantifier l'effet de ces phénomènes et scénarii sur les performances de ces familles de produits,
- listant les indicateurs visuels ou mesurables avec peu d'équipement (pour que les occupants puissent eux mêmes utiliser ces fiches).

III.2.2. Aide au diagnostic et à la réparation

La connaissance de l'ensemble des phénomènes et des scénarii de dégradation des produits de construction, ainsi que leur durée de vie et leur probabilité d'apparition, constitue une aide précieuse pour le diagnostic de produit, puisqu'il est possible :

- d'identifier les causes d'un phénomène observé sur un produit lors d'un diagnostic (à l'aide du graphe événementiel des défaillances temporalisé et probabilisé),
- de prévoir les conséquences de ce phénomène sur les performances du produit à plus ou moins long terme (à l'aide des profils multi-performances),
- d'orienter la recherche de réparation la mieux adaptée tant au niveau de la nature de la réparation (corriger les causes à l'origine de ce phénomène) qu'au niveau de la date d'intervention (les profils multi-performances peuvent indiquer si la ruine du produit est proche ou non).

Remarque : cette dernière proposition (orientation de la recherche de la réparation optimale), relève de nombreux aspects, tels que l'intégration des coûts, la disponibilité des réparateurs et des occupants, etc. qui n'ont pas été traités dans ce mémoire.

III.2.3. Aide à l'enseignement

La méthodologie proposée permet d'avoir une connaissance qualitative (modes, causes, conséquences) et quantitative (durée, probabilité, criticité, impacte sur les performances fonctionnelles) importante des phénomènes et des scénarii de dégradation des produits de construction, qui pourrait être intégrée dans les enseignements visant à apprendre des erreurs de conception et de mise en œuvre pour ne plus les reproduire. Cette proposition va dans le sens des conférences (par exemple, le 2ème symposium « Building Pathology, Durability and Rehabilitation » de 2003) et des groupes de travail (par exemple, le CIB W086 « Building Pathology ») véhiculant ce thème.

III.2.4. Perspectives pour la planification des opérations de maintenance

La méthodologie proposée dans ce mémoire permet d'obtenir la durée de vie et le profil multi-performance associé de tout produit de construction sans prendre en compte les opérations de maintenance.
Il serait alors intéressant d'étudier :

- l'impact des opérations de maintenance sur la structure et les fonctions d'un produit,
- les effets de ces opérations de maintenance sur les niveaux de performance d'un produit au moment de ces opérations,
- les effets de ces opérations sur les cinétiques d'évolution des niveaux de performance d'un produit à la suite de ces opérations de maintenance.

L'étude de cette perspective apporterait une aide précieuse pour la planification des opérations de maintenance, puisque les gestionnaires pourraient simuler l'effet des opérations de maintenance sur les performances des produits et ainsi optimiser la date d'intervention en fonction de ces informations et des contraintes auxquelles il est soumis (coûts, délais, etc.).

III.3. Développement du logiciel

La méthodologie proposée s'articule autour de méthodes (analyse qualitative et analyses quantitatives) de bases de données et d'outils de représentation qui requièrent des besoins d'automatisation différents.

III.3.1.1. Automatisation de l'analyse qualitative

L'analyse qualitative comporte plusieurs étapes qui ont été développées et qui sont liées entre elles dans un souci d'automatisation future :

- création de la BdD générique des agents environnementaux (*cf.* II.1 de la partie B), elle permet de modéliser tous les environnements des produits de construction par sélection et combinaison des agents environnementaux de cette base de données,
- création de la BdD générique des fonctions (*cf.* II.2 de la parte B), elle permet de modéliser le fonctionnement de tout produit,
- création de la BdD des phénomènes (*cf.* II.3 de la partie B), elle regroupe les phénomènes de dégradation des produits,
- introduction des « types de contact » et des « règles expertes » (*cf.* IV.1.2 de la partie B), ils permettent de modéliser l'évolution des flux d'agents environnementaux dans les produits.

Ces apports représentent un premier pas vers l'automatisation, mais nécessitent des développements complémentaires, qui sont actuellement menés à la division EPOD du CSTB.

Il existe également des logiciels d'AMDE commercialisés et dédiés au domaine industriel, qui constituent généralement des aides à la saisie des modes de défaillances. Mais ces logiciels ne correspondent pas à notre objectif d'automatisation qui est à terme d'obtenir les scénarii de dégradation d'un produit pour lequel ont été définies sa composition structurelle, les fonctions qu'il assure et son environnement.

Pour des informations complémentaires concernant les développements menés au CSTB en matière d'automatisation de l'AMDE (AMDE AO), le lecteur intéressé pourra se reporter aux mémoires de fin d'études [FAB, 05] et [BOI, 06] pour la construction et l'implémentation de la base de données des phénomènes et [JOF, 05] et [BOI, 06] pour l'automatisation de l'AMDE.

III.3.1.2. Automatisation des analyses quantitatives

L'automatisation des analyses quantitatives requiert différents outils dissociables les uns des autres :

- interfaces de saisies de données (durées, probabilités, caractéristiques intrinsèques, niveaux de performances), du point objectif et de validation par l'utilisateur pour l'étape de préparation des données (analyse temporelle et analyse des performances),
- interface de sélection de choix de stratégie de quantification temporelle (analyse temporelle),
- interface de saisie des valeurs des critères permettant d'estimer les probabilités d'apparition des phénomènes (analyse temporelle),
- interface de sélection de choix d'assemblage et outil de fusion des données, correspondant à l'automatisation de l'unification des données,
- outil permettant d'agréger les données (durées, probabilités, performances),
- outil permettant de gérer les interactions entre scénarii (analyse temporelle),

- interface de saisie des critères de criticité et outil d'obtention de la criticité (analyse de la criticité),
- interface de saisie des seuils de défaillance, des dates où l'on souhaite obtenir des profils multi-performances et outil de génération de l'analyse des performances,
- interface graphique permettant de visualiser les résultats de cette méthodologie (graphes de l'analyse qualitative, graphe événementiel des défaillances, arbre des défaillances, représentation radar « agents environnementaux », profils multi-performances),
- interface permettant à l'utilisateur d'implémenter les bases de données indépendamment de la méthodologie et interface permettant à l'administrateur du logiciel de valider ces données avant qu'elles ne soient enregistrées dans ces bases de données.

III.3.1.3. Automatisation des bases de données

Le format des cinq bases de données (agents environnementaux, fonctions, phénomènes, probabilités d'apparition, performances) a été défini, mais les états d'automatisation de ces bases de données sont différents :

- base de données « agents environnementaux » et « fonctions » : elles sont complètes et sont intégrées dans le logiciel d'AMDE AO développé par le CSTB,
- base de données « phénomènes » – partie qualitative : elle regroupe les phénomènes identifiés lors des applications de l'analyse qualitative menées jusqu'à ce jour, le département EPOD du CSTB est en charge de sont implémentation et elle sera prochainement intégrée dans le logiciel d'AMDE AO,
- base de données « phénomènes » – données quantitatives : la partie quantitative de cette base de données n'est pas renseignée pour l'instant, mais elle pourrait intégrer les données utilisées pour les applications présentées dans ce mémoire et pourrait être « fusionnée » avec la « plateforme durées de vie » développée et implémentée par le département EPOD,
- base de données « probabilités d'apparition » et « performances » : elles ne sont pas renseignées pour l'instant puisque nous n'avons pas collecté ce type de données pour les applications présentées dans ce mémoire.

III.3.1.4. Automatisation des outils de représentation

Afin de visualiser de manière claire et synthétique les principaux résultats de cette méthodologie (durées de vie, probabilités, classement et hiérarchisation des scénarii, graphe événementiel des défaillances, arbre des défaillances et profils multi-performances à des dates fixées par l'utilisateur), il est nécessaire de développer une interface de représentation graphique.

III.3.1.5. Organisation de l'automatisation globale de la méthodologie

La figure 86 schématise une proposition d'organisation des différents interfaces, outils et bases de données pour l'automatisation de la méthodologie proposée dans ce mémoire :

- interfaces de saisie par l'utilisateur et interface de validation par l'administrateur du logiciel représentées par des rectangles arrondis,
- outils de génération des analyses (qualitative et quantitatives) schématisés par des rectangles grisés,
- bases de données présentées à l'aide de « forme de base de données »,
- interfaces graphiques de représentation des résultats schématisées par des rectangles aux contours doubles.

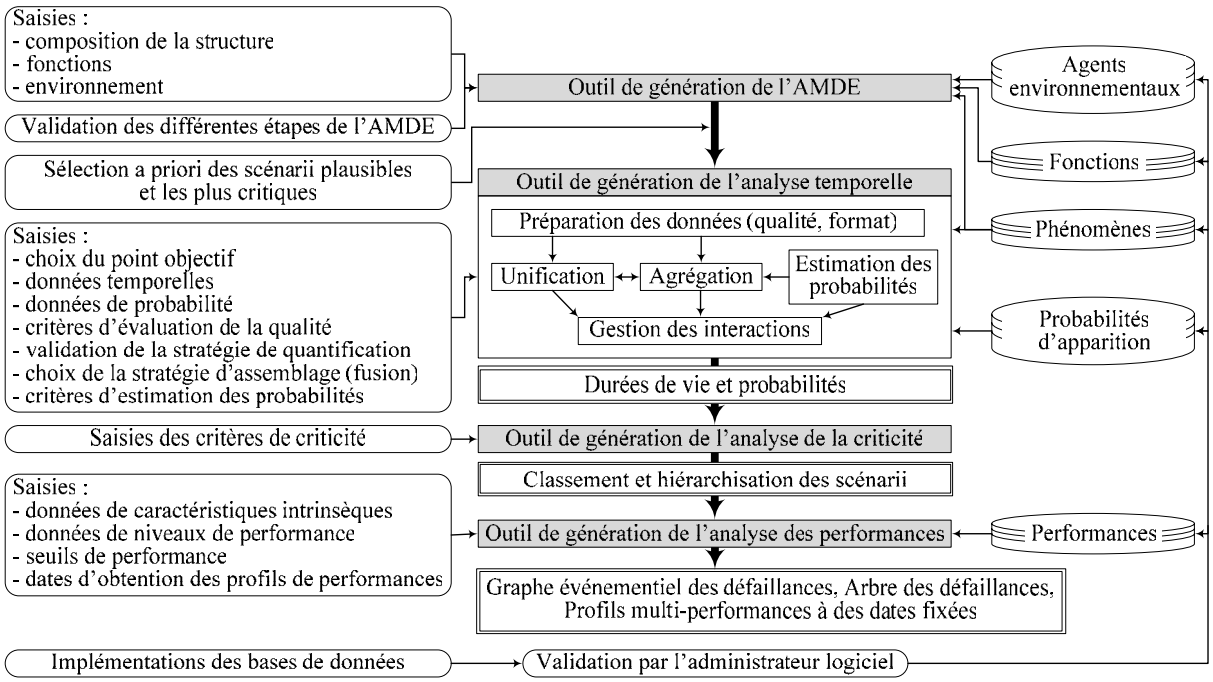


Figure 86 : Proposition d'organisation du logiciel associé à la méthodologie

III.4. Valorisation industrielle

La méthodologie proposée (ou l'une de ses parties) peut être valorisée industriellement, c'est-à-dire par le CSTB, d'au moins quatre manières :

- évaluation des produits,
- apport d'une méthodologie d'évaluation de la durée de vie,
- capitalisation des informations expertes,
- aide à l'élaboration d'expérimentations.

Nous détaillerons ensuite, les perspectives de couplage de cette méthodologie avec les aspects de coûts et de prise en compte de l'impact sur l'environnement qui correspondent à d'autres aspects essentiels du développement durable.

III.4.1. Evaluation des produits

Les évaluations des produits menées au CSTB sous forme d'avis techniques et de certification intègrent la notion de durée de vie de conception. L'intégration de la durée de vie prévue d'un produit de construction inclus dans un environnement climatique et d'usage envisagé et les scénarii de dégradation permettant d'obtenir cette durée de vie, tels que proposés dans ce mémoire, constituerait un gain d'information précieux.

III.4.2. Apport d'une méthodologie d'évaluation de la durée de vie

L'une des activités essentielle du CSTB, portée par le département EPOD du CSTB, consiste à évaluer la durée de vie des produits de construction. La méthodologie proposée dans ce mémoire s'intègre dans cette activité et offre un panel de stratégies de quantification permettant d'évaluer la durée de vie de tout type d'entité constructive (matériaux, composants, produits) en fonction des données disponibles et notamment celles obtenues lors des expérimentations « d'évaluation de la durabilité des matériaux » et collectées par l'intermédiaire de la « plateforme durées de vie ».

III.4.3. Capitalisation des informations expertes

Le CSTB possède une connaissance importante et une forte expertise dans le domaine des dégradations des entités constructives et de leurs durées de vie ; celles-ci sont pour l'essentiel soit stockées sous format papier soit portées par des personnes partant en retraite à plus ou moins court terme. Il est donc essentiel de capitaliser ces informations avant qu'elles ne soient plus utilisables. La méthodologie proposée constitue un format de capitalisation de ces connaissances et de cette expertise.

III.4.4. Aide à l'élaboration d'expérimentations

L'aide à l'élaboration d'expérimentations revêt deux aspects.
Le premier aspect est lié à la démarche d'expérimentation qui consiste avant toute chose à définir ce que l'on souhaite expérimenter et les conditions d'expérimentations. La connaissance des scénarii de dégradation des produits de construction et les conséquences qu'ils ont sur les niveaux de performance de ceux-ci, permettrait alors d'aider à la définition de ces conditions d'expérimentations.
Le deuxième aspect est lié aux résultats de la méthodologie ; nous avons vu au chapitre précédent comment les indicateurs de qualité associés aux résultats de durées de vie, de probabilités et de niveaux de performance permettaient de définir les informations qu'il était nécessaire de rechercher. Cette méthodologie permettrait donc d'aider à la définition des programmes de recherche en matière d'expérimentations.

III.4.5. Couplage de la méthodologie avec les aspects de coûts et d'impacts sur l'environnement

La méthodologie proposée s'intéresse à l'impact de l'environnement sur le fonctionnement du produit et à l'aspect technique de la gravité des conséquences. Il serait alors intéressant de coupler cette méthodologie avec les méthodologies, méthodes et outils existants en matière d'évaluation de l'impact des produits sur l'environnement climatique – développés notamment par le département Développement Durable – et le bien-être des usagers et en matière d'évaluation des coûts globaux nécessaires et engendrés par les scénarii de dégradation des produits – menés notamment par le département Economie et Sciences Humaines du CSTB – afin d'avoir une approche systémique en coût global des produits de construction.
Un tel couplage permettrait d'obtenir une information complète sur chaque produit de construction, et pourrait ainsi constituer une véritable aide au choix des produits de construction, tout en favorisant l'innovation (augmentation de la sécurité des usagers, diminution des impacts sur l'environnement, développement de climats intérieurs sains et confortables, réduction des coûts d'entretien, de maintenance et de réparation, etc.).

Synthèse aux applications, à l'analyse critique et aux développements

Les principales étapes de la méthodologie proposée dans ce mémoire (analyse qualitative, analyses quantitatives temporelles, de la criticité et des performances), ainsi que l'utilisation des bases de données et outils de représentation ont été illustrées dans le premier chapitre de cette partie à l'aide d'une fenêtre fixe, d'un mur en béton, d'un mur en briques et d'un complexe mur en béton et fenêtre.

L'utilisation de plusieurs applications a permis d'illustrer les apports méthodologiques essentiels que nous proposons :

- l'obtention de l'analyse qualitative des produits de construction par consultation d'expert et / ou par recherche dans la base de données « phénomènes »,
- la possibilité d'obtenir l'AMDE d'un assemblage de produits à partir des AMDE de ces produits,
- l'évaluation de la durée de vie de différentes entités constructives considérées dans un environnement déterminé, pour l'ensemble des scénarii ou pour un scénario précis, à partir de données multi-sources collectées à différents points de l'espace des évaluations,
- le classement et la hiérarchisation des scénarii par classes et ordre de criticité,
- l'obtention des profils multi-performances du mur en béton et du mur en briques à différents instants de leur vie en œuvre.

Ces applications ont également permis de comparer les résultats obtenus entre applications – analyses quantitatives de la criticité et des performances pour les deux types de murs – et entre démarches, c'est-à-dire celles que nous proposons et celles développées par le BEST du Politecnico di Milano (analyse fonctionnelle, analyse des performances).

L'analyse critique, présentée au deuxième chapitre de cette partie, a permis de comparer les différentes démarches adoptées pour étudier qualitativement puis quantitativement ces quatre applications et de compléter les interprétations des résultats obtenus au premier chapitre de cette partie. Cette analyse critique a également permis de récapituler et de préciser l'origine des hypothèses méthodologiques et applicatives que nous avons formulées en partie B et au premier chapitre de cette partie C. Les limites et perspectives de la méthodologie révélées par les applications et présentées dans cette analyse critique constituent un « plan de travail » qui devrait permettre d'analyser la sensibilité et la robustesse de la méthodologie que nous proposons.

Le dernier chapitre de cette partie regroupe les perspectives d'utilisation et de développement de cette méthodologie en termes d'implémentation en conception (identification des points sensibles, fiches d'aide à la mise en œuvre, prévision de la durée de vie, apports à la communication), d'implémentation en inspection, maintenance et réparation (fiche d'aide au suivi des produits en vie en œuvre, aide au diagnostic et à la réparation et aide à l'enseignement) d'automatisation et de valorisation industrielle (évaluation des produits, méthodologie d'évaluation de la durée de vie, capitalisation des informations expertes et aide à l'élaboration d'expérimentations).

Conclusion

La thèse défendue dans ce mémoire est qu'il est possible d'évaluer les profils multi-performances de tout produit de construction en service en utilisant des données (durées, probabilités, caractéristiques intrinsèques, niveaux de performances) multi-sources obtenues à différents points de l'espace des évaluations distincts ou non du point objectif défini par le quadruplet {entité géométrique, entité phénoménologique, entité fonctionnelle, date} où l'on souhaite obtenir ces profils. La solution retenue est celle d'une méthodologie regroupant un ensemble de méthodes, de bases de données et d'outils de représentation.

L'analyse bibliographique (partie A) montre que cette préoccupation est mondiale, concerne l'ensemble du secteur du BTP, et que des éléments de réponse partielle existent mais pas de façon ordonnée et organisée.

La partie B de ce mémoire est au cœur méthodologique de ces travaux de thèse. Cette méthodologie organise un ensemble de méthodes, applicables indépendamment les unes des autres, de base de données et d'outils de représentation.

Outre l'apport de la méthodologie même, nous prouvons qu'il est possible d'utiliser et de présenter les résultats suivants :

a) sur la méthodologie

L'intérêt essentiel de l'organisation de cette méthodologie réside dans le fait que l'utilisateur peut s'arrêter aux résultats qu'il souhaite obtenir sans appliquer la méthodologie complète ; il peut ainsi obtenir :

- la liste des scénarii de dégradation d'un produit en service,
- la durée de vie d'un matériau vis-à-vis d'un phénomène, ou d'un produit vis-à-vis d'un scénario ou d'un produit vis-à-vis de l'ensemble des scénarii, et les probabilités d'apparition de ce phénomène ou scénario ou ensemble de scénarii,
- la liste des scénarii classés à « criticité majeure » et / ou la hiérarchisation de l'ensemble des scénarii par ordre de criticité,
- les profils multi-performances à différents instants de sa vie en œuvre et / ou au début de sa vie en œuvre.

b) sur l'information

Il est possible d'unifier, à partir de la théorie de la fusion des données, plusieurs informations d'origines différentes. L'intérêt principal est de ne négliger aucune source d'information et aussi de savoir évaluer quelque soit la nature de l'information.
Il est aussi possible d'agréger des informations provenant de granularités différentes : cette possibilité permet de s'adapter aux données disponibles mais aussi à la finesse des résultats souhaités.

c) sur les données

Il a été montré d'une part l'intérêt des bases de données et en particulier les travaux de développement réalisés au CSTB, mais aussi la nécessité de qualifier les données introduites.

d) sur les phénomènes et les scénarii

Il ne s'agissait pas d'études physico-chimiques des phénomènes mais bien de leur recensement et de leur chainage dans des scénarii.
Il a été montré qu'il est possible d'obtenir ces enchaînements et que la notion de scénarii génériques permet de pouvoir passer rapidement d'un produit à des variantes ou de produits à un ouvrage.
La quantification des durées et des probabilités d'apparition des phénomènes et des scénarii est au cœur de ce travail ; nous ne prétendons pas avoir résolu tous les problèmes (par exemple l'indépendance des scénarii) mais proposons des approches simplifiées permettant ces évaluations.

La partie C de ce mémoire est un support de validation et d'illustration. Ces illustrations sont menés à l'aide de quatre applications réelles et complémentaires : une fenêtre fixe, un mur en béton, un mur en briques et un complexe mur en béton et fenêtre fixe.
L'analyse critique de la méthodologie et des applications présentées permet de mettre en évidence les différentes démarches qu'il est possible d'adopter pour étudier qualitativement puis quantitativement ces quatre applications et les interprétations des résultats obtenus.
La synthèse des hypothèses formulées et la présentation des limites et perspectives de la méthodologie proposée sont intégrées dans cette analyse critique et permettent de constituer un « plan de travail » pour l'amélioration de cette méthodologie.

Nous suggérons six perspectives essentielles :

Académiques

- une analyse de sensibilité des méthodes proposées,
- une utilisation d'autres outils issus de la théorie des graphes,
- une intégration de la problématique de maintenance,

Industrielles

- une poursuite de l'implémentation des bases de données,
- une simplification des méthodes de cette méthodologie,
- une automatisation de la méthodologie.

Concernant les développements industriels associés à cette méthodologie, elle offre un potentiel majeur pour l'implémentation en conception, l'implémentation en inspection, maintenance et réparation et la valorisation industrielle, telles 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 (activité portée par le département EPOD du CSTB), la capitalisation des informations expertes et l'aide à l'élaboration d'expérimentations.

Références bibliographiques

Ouvrages

[AFN, 98a]
AFNOR. AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité. Paris : Support de formation. Animé par Europe Qualité Service – AFNOR, 1998.

[ARM, 99]
ARMAND J., RAFFESTEIN Y. Conduire son chantier. Paris : Le Moniteur, 1999, 230 p.

[BAC, 98]
BACHA M. Estimation de modèles de durées de vie fortement censurées. Paris : Eyrolles, 1998, 130p.

[BER, 98]
BERTCHTOLD A. Chaînes de Markov et modèles de transition. Paris : Hermès, 1998, 284 p.

[BOU, 03]
BOUCHON-MENIER B., MARSALA C. Logique floue, principes, aide à la décision. Paris : Lavoisier, 2003, 252 p.

[BOU, 95]
BOUCHON-MENIER B. La logique floue et ses applications. Paris : Addison-Wesley, 1995, 257 p.

[CET, 98]
CETIM. La maîtrise des risques dans les PME-PMI. Senlis : CETIM, 1998, 27 p.

[CET, 97]
CETIM. La maîtrise des risques dans les PME : 10 exemples d'applications pratiques de la sûreté de fonctionnement . Senlis : CETIM, 1997, 200 p.

[COG, 03]
COGIS O., ROBERT C. Théorie des graphes. Paris : Vuibert, 2003, 251 p.

[CRE, 03]
CREMONA C. Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. Paris : Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2003, 448 p.

[DEN, 98]
DENIS H. Comprendre et gérer les risques sociotechnologiques majeurs. Montréal : Editions de l'école polytechnique de Montréal, 1998, 342 p.

[DEQ, 01]
DEQUAIRE-FALCONNET E., MELETON L. IDAR® : une méthode d'analyse des risques dans le cadre de la directive « machines ». Senlis : CETIM, 2001, 164 p.

[DER, 90]
DERRIEN, F. La corrosion des matériaux métalliques dans le bâtiment. Paris : CSTB, 1990. 217 p.

[DES, 03]
DESROCHES A., LEROY A., VALLEE F. La gestion des risques : principes et pratiques. Paris : Lavoisier, 2003, 286 p.

[DES, 96]
DESTRAC J-M., LEFAIVRE D., MALDENT Y., VILA S. Mémotech Génie Civil. Paris : Casteilla, 1996, 473 p.

[DES, 95]
DESROCHES A. Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité. Paris : Lavoisier, 1995, 188 p.

[DUB, 80]
DUBOIS D., PRADE H. Fuzzy sets and systems: theory and applications. Boston : Academic Press, 1980, 393 p.

[FAU, 04]
FAUCHER J. Pratique de l'AMDEC. Paris : DUNOD, 2004, 177 p.

[FIS, 81]
FISCHHOFF B., LICHTENSTEIN S., SLOVIC P., DERBY S. L., KEENEY R. L. Acceptable risk. New York : Cambridge University Press, 1981, 185 p.

[FUN, 90]
FUNTOWICZ S. O., RAVETZ J. R. Uncertainty and Quality in Science for Policy. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1990, 229 p.

[HAD, 97]
HADJ-MABROUK H. L'analyse préliminaire de risques. Paris : Hermès, 1997, 125 p.

[ISD, 90]
ISDF. AMDEC – Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité – Guide pédagogique. Nanterre : ISDF – Institut de la Sûreté de Fonctionnement, 1990, 36 p.

[JAN, 97]
JANEZ F. Fusion de sources d'information définies sur des référentiels non exhaustifs différents. Angers : Université d'Angers, 1997, 215 p.

[KAU, 68]
KAUFMANN A. Des points et des flèches … la théorie des graphes. Paris : Dunod, 1968, 155 p.

[LAS, 01]
LASNIER G. Gestion industrielle et performances. Paris : Hermès Science Europe Ltd, 2001, 539 p.

[LES, 91]
LE SELLIN Y. Réussir la qualité dans la construction. Paris : Editions du Moniteur, 1991, 227 p.

[LOR, 99]
LORUSSO S., MARABELLI M., VIVIANO G. Pollution de l'environnement et impact sur les biens culturels. Château-Gontier : EREC, 1999, 254 p.

[MAG, 92]
MAGGI P. N., GOTTFRIED A. MORRA L. Qualità tecnologica dei prodotti complessi per l'edilizia (1). Bologna: Esculapio, 1992.

[MOD, 93]
MODARRES M. What every engineer should know about reliability and risk analysis. New York : Marcel Dekker INC, 1993, 350 p.

[MUC, 94]
MUCCHIELLI A. Les méthodes qualitatives. Que sais-je ? n° 2591. Paris : Presses Universitaires de France, 1994, 128p.

[MUR, 04]
MURTHY D. N. P., XIE M., JIANG, R. Weibull Models. Hoboken : John Wiley & Sons, 2004, 383 p.

[PAG, 80]
PAGES A., GONDRAN M. Fiabilité des systèmes. Paris : Eyrolles, 1980, 323 p.

[PER, 00]
PERETTI-WATEL P. Sociologie du risque. Paris : Armand Colin, 2000, 286 p.

[PER, 95]
PERRET J. Guide de la maintenance des bâtiments. Paris : Le Moniteur, 1995, 431 p.

[PIL, 94]
PILLET M. Introduction aux plans d'expérience par la méthode Taguchi. Paris : Organisation, 1994, 238 p.

[PRO, 03]
PROCACCIA H., SUHNER M-C. Démarche bayésienne et applications à la sûreté de fonctionnement. Paris : Lavoisier, 2003, 411 p.

[PUC, 86]
PUCCINI F. Durabilité des matériaux : rapport d'enquête. Paris : ANRT, 1986, 112 p.

[QUI, 99]
QUITTET C., NELIS H. HACCP pour PME et Artisan. Gembloux : Les Presses agronomiques de Gembloux, 1999, 605 p.

[REJ, 95]
REJNA M. Valutazione della qualità tecnologica utile dei prodotti complessi per l'edilizia. Bologna : Esculapio, 1995.

[ROY, 85]
ROY B. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Paris : Economica, 1985, 423 p.

[SHA, 76]
SHAFER G. A mathematical Theory of evidence. Chichester : Princeton University Press, 1976, 297 p.

[VIG, 03]
VIGAN J. de. Dicobat – Dictionnaire général du bâtiment. Paris : Editions Arcatures, 2003, 1181 p.

[VIL, 88]
VILLEMEUR A. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Paris : Eyrolles, 1988, 798 p.

[WEA, 75]
WEAVER W., SHANNON C. E., MOLES A. A., COSNIER J. Théorie mathématique de la communication. Paris : C.E.P.L., 1975, 188 p.

[ZWI, 95]
ZWINGELSTEIN G. Diagnostic des défaillances. Paris : Hermès, 1995, 601 p.

[ZWI, 96]
ZWINGELSTEIN G. La maintenance basée sur la fiabilité. Paris : Hermès, 1996, 666 p.

Thèses

[COU, 97]
COURILLEAU E. Analyse statistique de données routières appliquée au développement de modèle de gestion de l'entretien. Thèse Sciences Appliquées. Clermont-Ferrand : Université de Blaise Pascal – Clermont II, LGC et LCPC, 1997, 148 p.

[IAC, 05]
IACONO P. Proposizione di un percorso metodologico applicabile alla valutazione della durabilità di elementi tecnici edilizi e degli elementi funzionali costituenti. Thèse Système et Processus de Construction. Milan : Polytechnic of Milan – Département Building Environment Science & Technology, 2005.

[LAI, 00]
LAIR J. Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment. Thèse Génie Civil. Clermont-Ferrand : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment – service Matériaux et Laboratoire d'Etudes et de Recherches en MEcaniques des Structures, 2000, 213 p.

[LEM, 06]
Lemaire S. Aide au choix des produits de construction sur la base de leurs performances environnementales et sanitaires. Thèse Génie Civil. Lyon : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006, 271 p.

[PEY, 02]
PEYRAS L. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages – Développement de méthodes d'aide à l'expertise. Thèse Génie Civil. Clermont-Ferrand : Université Blaise Pascal – Clermont II, LERMES et CEMAGREF, 2002, 200 p.

[REC, 04]
RECHE M. Effet des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées. Thèse Génie Civil. Clermont-Ferrand : Université Blaise Pascal, LGC et LCPC, 2004, 172 p.

[ROL, 98]
ROLLINGER R. Application de la sûreté de fonctionnement à l'optimisation de la maintenance des bâtiments et des infrastructures techniques – la méthode SINPATI Sélection des INvestissements pour le PAtrimoine Technique et Immobilier. Thèse Sciences Appliquées. Nancy : Université Nacy 1, 1998, 205 p.

[SER, 05]
SERRE D. Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations – Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique. Thèse Sciences de l'Information Géographique. Marne-La-Vallée : Université de Marne-La-Vallée, 2005, 363 p.

Rapports

[BOI, 06]
BOILEVE C. Contribution au développement de l'AMDE Assistée par Ordinateur pour les produits de construction. Mémoire de diplôme d'ingénieur CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand : CUST, 2006, 116 p.

[BRU, 87]
Brundtland G. H. Our Common Future. World Commission on Environment and Development, 1987, 318 p.

[CIB, 82]
CIB. Working with the performance approach in building. Publication n°62. Working commision 60 « The Performance Concept in Building ». Rotterdam : International Council for Building Research Studies and Documentation, 1982, 34 p.

[CIB, 75]
CIB. The performance concept and its terminology – Le concept de performance et sa terminologie. Working commision 60 « The Performance Concept in Building ». Rotterdam : International Council for Building Research Studies and Documentation, 1975, 8 p.

[FAB, 05]
FABRE M. Analyse qualitative et quantitative du comportement d'éléments en béton armé. Mémoire de diplôme d'ingénieur CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand : CUST, 2005, 171 p.

[HAA, 96]
HAAGENRUD S. E. Environmental Characterization including Equipment for Monitoring. Institut for Luftforskning. NILU. Ref. O-90043. CIB W80 / RILEM 140-PSL, 1995, 116 p.

[HOV, 04]
HOVDE P. J., MOSER K. Performance Based Methods for Service Life Prediction – State of the Art Report Part A & Part B. Publication CIB n° 294. Working commision 80 « Service Life Methodologies – Prediction of Service Life for Buildings and Components ». Rotterdam : International Council for Building Research Studies and Documentation, 2004, 95 p.

[JER, 04]
JERNBERG P., LACASSE M. A., HAAGENRUD S. E., SJOSTROM C. Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components. Publication n°295. Working commision 80 « Service Life Methodologies – Prediction of Service Life for Buildings and Components ». Rotterdam : International Council for Building Research Studies and Documentation, 2004, 345 p.

[JOF, 05]
JOFFRE C. Construction d'un outil informatique permettant la réalisation d'AMDEC sur les produits de construction. Rapport de stage. Grenoble : ENSHMG, 2005.

[LAI, 03a]
LAIR J., TALON A., LAPORTHE S. Fiabilité et durabilité des systèmes solaires thermiques. ACTION 3 de la convention ADEME n° 01.05.128, 2ème rapport, 2003, 34 p.

[LAI, 03b]
LAIR J. Failure Modes and Effect Analysis, Service Life Prediction, Rapport intermédiaire (D4-C2-jl-01 Draft 2), IEA Task 27 (Projet C2 : Failure Mode Analysis), février 2003, 47p.

[LEE, 03]
LEE A., BARRETT P. Performance Based Building: First International State-of-the-Art Report. Rotterdam : International Council for Research and Innovation in Building and Construction, 2003, 38 p.

[LEM, 66]
LEMAIRE M., MUZEAU J-P., MOHAMED A., MITTEAU J-C. Fiabilité et Sûreté de fonctionnement des systèmes mécaniques. Support de cours. Clermont-Ferrand : CUST, 1966, 327 p.

[LOP, 01]
LOPES A. Mise en place d'une méthode d'analyse des modes de défaillances des produits du bâtiment pour l'élaboration d'un logiciel d'aide à la décision. Mémoire de diplôme d'ingénieur CUST Génie Civil. Clermont-Ferrand : CUST, 2001, 99 p.

[PIB, 95]
PIBAT. Vieillissement des éléments de construction et coût d'entretien – Données pour l'entretien et la rénovation des immeubles d'habitation. Berne : Office fédéral des questions conjoncturelles, 1995, 110 p.

[PLA, 03]
PLATZER W. J. Switchable Facade Technology – Final Technical Report. n° swiftpr-coord-030730. SWIFT Project, juillet 2003, 106 p.

[TAL, 06]
TALON A., CHEVALIER J-L., HANS J. Failure Modes Effects and Criticality Analysis Research for and Application to the Building Domain. Publication CIB n° 310. Working commision 80 « Service Life Methodologies – Prediction of Service Life for Buildings and Components ». Rotterdam : International Council for Building Research Studies and Documentation, 2006, 246 p.

[TAL, 02]
TALON A. Développement d'une méthode d'analyse de risques des produits de construction basée sur l'AMDEC. Mémoire de diplôme d'ingénieur CUST Génie Civil / Mémoire de DEA Génie Mécanique et Génie Civil. Clermont-Ferrand : CUST, 2002, 193 p.

[TRI, 90]
TRIBU. Evaluation des données disponibles concernant la durabilité des matériaux, composants et équipements en vue de leur utilisation pour des outils de maintenance. PARIS : Techniques Recherches et Innovations pour le Bâtiment et l'Urbain, 100 p.

Périodiques et Conférences

[AQC, 01]
Agence Qualité Construction. Les micro-organismes en façade. Fiche Pathologie du bâtiment n°D.07.

[ASP, 02]
Aspen Research Corporation. Deliverables for Phase I of the DOE project – An Insulating Glass Knowledge Base. Août 2002, IGMA Technical Division Meeting.

[AUG, 03]
Association Universitaire de Génie Civil. XXIèmes rencontres universitaires de Génie Civil. Le Développement Durable en Génie Civil. Session 8 : durabilité des structures. La Rochelle : 2 et 3 juin 2003, 42 p.

[BAR, 99]
BARTLETT E. V., CLIFT M. Reliability and Whole Life Performance : Integrating the supply chain. **In** : LACASSE M. A., VANIER D. J. Durability of Building Materials and Components 8, 30 mai – 3 juin 1999, Vancouver. Ottawa : National Research Council Canada, 1999, pp. 1916 - 1923.

[BOW, 95]
BOWLES J. B., PELAEZ C. E. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. Reliability Engineering and System Safety, 1995, vol. 50, pp. 203-213.

[BRA, 99]
BRANDT E., WITTCHEN K. B. EPIQR – A new surveying tool for maintenance and refurbishment. **In** : LACASSE M. A., VANIER D. J. Durability of Building Materials and Components 8, 30 mai – 3 juin 1999, Vancouver. Ottawa : National Research Council Canada, 1999, pp. 1576-1584.

[CAH, 91]
CAHOUR B., FALZON P. Assistance à l'opérateur et modélisation de sa compétence. Intellectica, 1991, 2, 12, pp. 159-186.

[CAR, 04]
CARLSSON B., MOLLER K., KOHL M., HECK M., BRUNOLD S., FREI U., MARECHAL J-C., JORGENSEN G. The applicability of accelerated life testing for assessment of service life of solar thermal components. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2004, vol. 84, pp. 255–274.

[CAR, 02]
CARLSSON Bo., MOLLER K., MARECHAL J-Ch., KOHL M., HECK M., BRUNOLD S., JORGENSEN G. General Methodology Of Test Procedures For Assessment Of Durability And Service Life. **In** : 9th Durability of Building Materials and Components, 17-21 mars 2002, Brisbane. Melbourne : CSIRO, 2002, papier n° 212.

[CHE, 03]
CHEVALIER J-L., LAIR J., TALON A., BOISSIER D. Failure Mode Effect and Criticality Analysis for decision aida t design and explotation stages. **In** : SARJA A. Integrated Lifetime Engineering of Buildings and Civil Infrastructures – ILCDES 2003, 1-3 décembre 2003, Kuopio. Helsinki : Association of Finnish civil engineers, 2003, 10 p.

[CUR, 05]
CURCIJA C., DUKOVSKI I., VELTHIUS H., FAIRMAN J., DOLL M. Real-time simulations of the durability of Insulating Glass Units. **In** : CHEVALIER, J-L. 10th Durability of Building Materials and Components, 17-20 avril 2005, Lyon. Paris : CSTB, 2005, 8p.

[CUS, 03]
CUSMANO G., LUCCHINI A. Implementing The Factor Method For Service Life Estimation Using Weighted – Factors. **In** : DANIOTTI B. International Workshop on Management of Durability in the Building Process, 25–26 juin 2003, Milan. Milan: Politecnico di Milano, 2003, ref n° 59.

[CST, 05]
CSTB. Revêtements de sol céramiques. Cahiers du CSTB n° 3515, e-cahiers du CSTB, 2005.

[CST, 00]
CSTB. Revêtements de sols industriels – Classement performanciel – Référentiel technique. Cahiers du CSTB n° 3232, livraison 410, 2000.

[CST, 96]
CSTB. Certification ACERMI – Exemples d'usages des propriétés certifiés. Cahiers du CSTB n° 2928, livraison 375, 1996.

[CST, 93]
CSTB. Directive européenne sur les produits de construction et documents interprétatifs. Cahiers du CSTB n° 2704, 1993.

[DAN, 05]
DANIOTTI B., IACONO P. Evaluating the Service Life of External Walls: a Comparison between Long-Term and Short-Term Exposure. **In** : CHEVALIER J-L. 10th Durability of Building Materials and Components, 17-20 avril 2005, Lyon. Paris : CSTB, 2005, 8p.

[DAN, 03]
DANIOTTI B., IACONO P. Long – Term Degradation Under Outdoor Exposure Conditions. **In** : DANIOTTI B. International Workshop on Management of Durability in the Building Process, 25–26 juin 2003, Milan. Milan: Politecnico di Milano, 2003, ref n° 61.

[DEM, 67]
DEMPSTER A. P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. Annals of Mathematical Statistics, 1967, vol. 38 pp. 325-339.

[DUB, 90]
DUBOIS D., PRADE H. Consonant approximations of belief functions. International Journal of Approximate Reasoning, 1990, vol. 4 pp 419-449.

[DUB, 88]
DUBOIS D., PRADE H. Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures. Computer Intellingency, 1988, vol. 4 pp 244-264.

[EST, 97]
ESTOUP J-P. Salissures et nettoyage des façades d'immeubles. Sycodès information n°40. Paris : Qualité construction, 1997.

[GUI, 04]
GUIMARAES A. C. F., LAPA C. M. F. Effects analysis fuzzy inference system in nuclear problems using approximate reasoning. Annals of Nuclear Energy, 2004, vol. 31, pp. 107–115.

[HAA, 85]
HAAGENRUD S. E. Mathematical modelling of atmospheric corrosion and environmental factors. **In** : MASTERS L. W. Problems in Service Life Prediction of Building and Construction Materials. Boston: Martinus Nijhoff Publishers, 1985, pp. 229-252.

[HAG, 02a]
HAGE R. A Methodology for Ensuring Durability of New Product Offerings. **In** : IGMA Technical Division Meeting, 2002, 6 p.

[HAG, 02b]
HAGE R. Capturing Insulating Glass Failure Events Using Failure Modes and Effects Analysis and Event Trees. **In** : IGMA Technical Division Meeting, 2002, 10 p.

[HAG, 02c]
HAGE R., EASTEP M. Methodology for Top Level Durability Assessment of Existing Insulating Glass Units. **In** : IGMA Technical Division Meeting, 2002, 6 p.

[JRE, 04]
JREIJIRY D., HUSAUNNDEE A., INARD C., VILLENAVE J. G. Ventilation control based on indoor air quality using SIMBAD building and HVAC toolbox. **In** : ELMAHDY H. CIB World Building Congress 2004, 3-7 mai 2004, Toronto. Rotterdam : CIB, 2004, 10 p.

[KLI, 04]
KLIR G. J. Generalized information theory: aims, results, and open problems. Reliability Engineering and System Safety, 2004, vol. 85, pp. 21-38.

[KOD, 04]
KODUR V. K. R. Role of fire resistance issues in the first ever collapse of a stell-framed building – WTC 7. **In** : ELMAHDY H. CIB World Building Congress 2004, 3-7 mai 2004, Toronto. Rotterdam : CIB, 2004, 12 p.

[LAI, 03c]
LAIR J. Méthodes opérationnelles pour la prise en compte de la durabilité dans la norme ISO 15686 « Service Life Planning ». **In** : INARD C. XXIèmes rencontres universitaires de Génie Civil, 2-3 juin 2003, La Rochelle. La Rochelle : AUGC, 2003, 8p.

[LAY, 98]
LAYZELL J., LEDBETTER S. FMEA Applied to cladding systems – reducing the risk of failure. Building Research and Information, 1998, 26(6), pp. 351-357.

[LEM, 00]
LE MONITEUR. Loi relative à la solidarité et au renouvellement urbains. Le Moniteur, 2000, numéro 5065, cahier spécial n°3, 2000, 40 p.

[MAG, 98]
MAGGI P. N., REJNA M., RAVETTA F. Functional analysis as a method to design new building components. **In :** CIB World Building Congress 1998, 7-12 juin 1998, Gävle, Suède. 7 p.

[MAY, 05]
MAYMON G. Probabilistic crack growth behavior of aluminum 2024-T351 alloy using the 'unified' approach. International Journal of Fatigue, 2005, vol. 27, Iss. 7, pp. 828-834.

[MOR, 05]
MORTUREUX Y. La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques. **In** : Techniques de l'Ingénieur. n° BM 5008. Paris : 2005, 17 p.

[MOR, 02a]
MORTUREUX Y. Arbres de défaillance, des causes et d'événement. **In** : Techniques de l'ingénieur. n° SE 4050. Paris : 2002, 24 p.

[MOR, 02b]
MORTUREUX Y. Analyse préliminaire de risques. **In** :Techniques de l'ingénieur. n° SE 4010. Paris : 2002, 10 p.

[MOS, 03]
MOSER K. Engineering design methods for service life planning – state of the art. **In** : DANIOTTI B. International Workshop on Management of Durability in the Building Process, 25–26 juin 2003, Milan. Milan: Politecnico di Milano, 2003, ref n° 40.

[MOS, 99]
MOSER K. Towards the practical evaluation of service life – Illustrative application of the probabilistic approach. **In** : LACASSE M. A., VANIER D. J. Durability of Building Materials and Components 8, 30 mai – 3 juin 1999, Vancouver. Ottawa : National Research Council Canada, 1999, pp. 1319-1329.

[NAN, 06]
NANDA A. K., PAUL P. Some results on generalized residual entropy. Information Sciences, 2006, vol. 176, Iss. 1, pp. 27-47.

[NAT, 06]
NATESAN M., VENKATACHARI G., PALANISWAMY N. Kinetics of atmospheric corrosion of mild steel, zinc, galvanized iron and aluminium at 10 exposure stations in India. Corrosion science, 2006, article sous presse.

[PIL, 03]
PILLAY A., WANG J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. Reliability Engineering and System Safety, 2003, vol. 79, pp. 69-85.

[POL, 03]
POLLO R. Service Life and LCC Assessment. The Use Of FMEA As Design Tool. **In** : DANIOTTI B. International Workshop on Management of Durability in the Building Process, 25–26 juin 2003, Milan. Milan: Politecnico di Milano, 2003, ref n° 24.

[REC, 05]
RE CECCONI F., IACONO P. Enhancing the Factor Method – Suggestions to Avoid Subjectivity. **In** : CHEVALIER J-L. 10th Durability of Building Materials and Components, 17-20 avril 2005, Lyon. Paris : CSTB, 2005, 9p.

[REC, 03a]
RE CECCONI F. Service life planning: further developing of the factor method. **In** : DANIOTTI B. International Workshop on Management of Durability in the Building Process, 25–26 juin 2003, Milan. Milan: Politecnico di Milano, 2003, ref n° 66.

[REC, 03b]
RE CECCONI F., IACONO P. "Performance Limits Method" (PLM) – A New Way To Service Life Prediction. **In** : DANIOTTI B. International Workshop on Management of Durability in the Building Process, 25–26 juin 2003, Milan. Milan: Politecnico di Milano, 2003, ref n° 63.

[REJ, 99]
REJNA M. Evaluation of functionality of building components applicable tp service life design. **In** : LACASSE M. A., VANIER D. J. Durability of Building Materials and Components 8, 30 mai – 3 juin 1999, Vancouver. Ottawa : National Research Council Canada, 1999, pp. 1475-1484.

[SHA, 48]
SHANNON C. E. A Mathematical Theory of Communication. The Bell System Technical Journal, 1948, vol. 27, pp. 379-423 et 623-656.

[TAL, 05a]
TALON A., BOISSIER D., CHEVALIER J-L., HANS J. Temporal quantification method of degradation scenarios based on FMEA. **In** : CHEVALIER J-L. 10th Durability of Building Materials and Components, 17-20 avril 2005, Lyon. Paris : CSTB, 2005, 8p.

[TAL, 05b]
TALON A. Des phénomènes de degradation au profil multi-performances des produits de construction. **In** : GOTTELAND P., PLE O. XXIIIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil – Prix Jeunes Chercheurs, 26-27 mai 2005, Grenoble. Grenoble : AUGC, 2005, 8 p.

[TAL, 04]
TALON A., BOISSIER D., CHEVALIER J-L., HANS J. A methodological and graphical decision tool for evaluating building component failure. **In** : ELMAHDY H. CIB World Building Congress 2004, 3-7 mai 2004, Toronto. Rotterdam : CIB, 2004, 9 p.

[TAL, 03a]
TALON A., CHEVALIER J-L., HAGE R., FAIRMAN J. E. FMEA as a Risk Analysis Decision Aid Tool for Design and Maintenance Planning : Application to Windows and Solar Collectors. **In** : IEA SHC Task 27 Dissemination Workshop, 6 octobre 2003, Freiburg, 25 p.

[TAL, 03b]
TALON A., BOISSIER D., CHEVALIER J-L. Capitalization and use of experience and knowledge on building products degradation. **In** : VILHENA A. 2nd International Symposium on Building Pathology, Durability and Rehabilitation – BPDR 2003, 6-8 novembre 2003, Lisbonne. Lisbonne: LNEC, 2003, 10 p.

[TAL, 03c]
TALON A., LAIR J., BOISSIER D. Failure Mode Effect and Criticality Analysis to improve the quality of building products and processes. **In** : DANIOTTI B. International Workshop on Management of Durability in the Building Process, 25–26 juin 2003, Milan. Milan: Politecnico di Milano, 2003, ref n° 16.

[TAL, 03d]
TALON A., LAIR J., BOISSIER D. Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets appliquée à l'analyse de risques et la planification de la maintenance. **In** : SENECHAL O. Performances et nouvelles technologies en maintenance – PENTOM 2003, 26-28 mars 2003, Valenciennes. Valenciennes : LAMIH, 2003, 10 p.

[TEP, 03]
TEPLY B., KERSNER Z., ROVNANIKOVA P. Risk analysis using Factor method. **In** : DANIOTTI B. International Workshop on Management of Durability in the Building Process, 25–26 juin 2003, Milan. Milan: Politecnico di Milano, 2003, ref n° 28.

[VAN, 05]
VAN DORP J. R., MAZZUCHI T. A. A general Bayes weibull inference model for accelerated life testing. Reliability Engineering & System Safety, 2005, vol. 90, Iss. 2-3, pp.140-147.

[WYA, 05]
WYATT D. P. The contribution of FMEA and FTA to performance review and auditing of service life design constructed asset. **In** : CHEVALIER J-L. 10th Durability of Building Materials and Components, 17-20 avril 2005, Lyon. Paris : CSTB, 2005, 8p.

[WU, 05]
WU X-F., DZENIS Y. A., Experimental determination of probabilistic edge-delamination strength of a graphite-fiber/epoxy composite. Composite structures, 2005, vol. 70, Iss. 1, pp. 616-624.

[ZAD, 78]
ZADEH L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems, 1978, vol. 1, Iss. 1, pp. 3-28.

[ZAD, 65]
ZADEH L. A. Fuzzy sets. Information and control, 1965, vol. 8, Iss. 3, pp. 338-353.

Normes

[AFN, 05]
AFNOR. Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité. NF EN206-1, 2005, 95 p.

[AFN, 04a]
AFNOR. Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la résistance au vieillissement accéléré au brouillard salin. NF EN 14147, 2004, 13 p.

[AFN, 00a]
AFNOR. Verre dans la construction - Vitrage de sécurité - Mise à essai et classification de la résistance à l'attaque manuelle. NF EN 356, 2000, 24 p.

[AFN, 00b]
AFNOR. Essais de résistance au feu des éléments porteurs - Partie 1 : murs. NF EN 1365-1, 2000, 28 p.

[AFN, 98b]
AFNOR. Performance thermique des bâtiments - Détermination de la résistance thermique selon la méthode de la boîte chaude avec fluxmètre - Maçonnerie. NF EN 1934, 1998, 32 p.

[AFN, 97]
AFNOR. Travaux de bâtiment - Couvertures en plaques nervurées issues de tôles d'acier revêtues - Partie 1 : cahier des clauses techniques. NF P34-205-1, 1997, 42 p.

[AFN, 95]
AFNOR. Eurocode 5 – Calcul des structures en bois – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. XP ENV 1995-1-1, 1995, 143 p.

[AFN, 92]
AFNOR. Béton – Classification des environnements agressifs. NF P 18-011, 1992.

[AFN, 88]
AFNOR. Terminologie relative à la fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité. NF X60-500, 1988, 44 p.

[AFN, 86]
AFNOR. Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes - Procédures d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). NF X60-510, 1986, 24 p.

[AIJ, 93]
AIJ. The English Edition of Principal Guide for Service Life Planning of Buildings. Tokyo : Architectural Institute of Japan, 1993.

[AST, 80]
American Society for Testing and Materials. Military standard procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis. MIL-STD-1629 A, 1980, 54 p.

[AST, 78]
American Society for Testing and Materials. Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials. ASTM E 632-82, 1978.

[BSI, 92]
BSI. Guide to durability of buildings and building elements, products and components. BS 7543, 1992.

[CSA, 95]
Canadian Standards Association. Guideline on Durability in Buildings. CSA S478-95, 1995, 93 p.

[DEP, 80]
DEPARMENT OF DEFENSE. Military standard procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis. MIL-STD-1629A, 1980, 54 p.

[EOT, 99]
EOTA. Assessment of working life of products. Guidance Document 003, 1999, 26 p.

[IEC, 85]
IEC. Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes – procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). IEC 60812, 1985, 46 p.

[ISO, 05a]
International Organization for Standardization. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles. ISO/WD 15686-1.2, 2005, 39 p.

[ISO, 05b]
International Organization for Standardization. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 2, Service life prediction procedures. ISO 15686-2, 2005.

[ISO, 05c]
International Organization for Standardization. Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 8 : Reference service life. ISO/DIS 15686-8, 2005, 23 p.

[ISO, 99]
International Organization for Standardization. Plastiques – Méthodes d'exposition à des sources lumineuses de laboratoire – Partie 1: Guide général. ISO 4892-1, 1999, 18 p.

[ISO, 84]
International Organization for Standardization. Performance standards in building – Principles for their preparation and factors to be considered. ISO 6241, 1984, 12 p.

Supports électroniques

[AFN, 04b]
AFNOR. Recueil Eurocodes [CDROM]. La Plaine Saint Denis : AFNOR, 2004.

[CST, 06]
CSTB. Investimmo **[en ligne]**. Disponible sur : <http://investimmo.cstb.fr/> (consulté le 13.02.2006).

[GAB, 06]
GABRIEL M. AMDEC **[en ligne]**. Disponible sur : <www.cyber.uhp-nancy.fr/demos/MAIN-003/chap_deux/index.html> (consulté le 15.02.2006).

[EDI, 03]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Paris : CSTB, 2003.

[IMD, 04]
IMdR-SdF. Groupe de travail Management Méthodes Outils Standard (M2OS) – Fiches Méthodes **[en ligne]**. IMdR-SdF, 2004. Disponible sur : <http://www.imdr-sdf.asso.fr/v2/extranet/images/Fiches_Methodes-b.pdf> (consulté le 11.05.2005).

[INE, 03]
INERIS. Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle **[en ligne]**. INERIS, 2003. Disponible sur : <http://www.ineris.fr/> (consulté le 11.05.2005).

[INR, 03]
Institut National de la Recherche Agronomique. Gestion de l'incertitude pour le diagnostic par le modèle de croyance transférée **[en ligne]**. 2003 Disponible sur : <http://www2.laas.fr/asinbio/SteyerLardon.pdf> (consulté le 8.06.2005).

[SAH, 06]
SAHRAOUI A-E-K. Méthodes et techniques : AMDEC, RCM, MAC…**[en ligne]**. Disponible sur : <http://www.laas.fr/~kader/MI5.fr> (consulté le 15.02.2006).

[SCT, 03]
SCTRICK L., GOUSSY B. Document unique concernant les risques biologiques – Risque d'accident exposant au sang (et autres liquides biologiques) **[en ligne]**. Septembre 2003. Disponible sur : <http://anmteph.chez-alice.fr/docuniqaes.pdf> (consulté le 15.02.06).

Index des figures

Figure 1 : Représentation des notions de performance et de durées de vie 7
Figure 2 : Activités de FMDS intégrées dans les objectifs de la Sûreté de Fonctionnement [DES, 03] 13
Figure 3 : Principales phases d'une démarche d'AMDEC [ISD, 90] 15
Figure 4 : Comparaison des approches AMDE du domaine industriel et du domaine de la construction 17
Figure 5 : Diagramme de Farmer [MOR, 05] 22
Figure 6 : Exemple de matrice de criticité – cas d'une installation frigorifique à l'ammoniac [CET, 97] 24
Figure 7 : Fonction d'appartenance de la détectabilité [BOW, 95] 26
Figure 8 : Exemple de matrice de criticité – formulation à cinq critères 28
Figure 9 : Démarche itérative de l'analyse de la criticité [FAU,04] 28
Figure 10 : Méthodologie d'évaluation de la durée de vie d'un matériau – comparaison expositions courte durée accélérée et longue durée [JER, 04] 34
Figure 11 : Caractéristiques d'un sous-ensemble flou trapézoïdal A de X 35
Figure 12 : Principales formes de fonction d'appartenance 36
Figure 13 : Capture d'écran de résultats du logiciel Edifice – exemple d'une fenêtre en PVC [LAI, 03c] 39
Figure 14 : Approche, perspective et champ d'application des domaines du réseau PeBBu [LEE, 03] 41
Figure 15 : Evolution de la température superficielle interne d'un mur traditionnel italien [IAC, 05] 43
Figure 16 : Signification des deux indicateurs de « propension à la durée de vie » [IAC, 05] 44
Figure 17 : Algorithme de comparaison de deux produits [IAC, 05] 44
Figure 18 : Illustration d'emplacements de points d'évaluation dans l'espace des évaluations 50
Figure 19 : Structuration des propositions 52
Figure 20 : Principe de la méthode de transformation d'une donnée brute 55
Figure 21 : Principe de la méthode de traitement des données élaborées 60
Figure 22 : Illustration de la préparation d'une donnée élaborée – cas du modèle de type 1 61
Figure 23 : Illustration de la préparation d'une donnée élaborée – cas du modèle de type 2 62
Figure 24 : Exemples d'entropie propre associés aux figures 22 et 23 65
Figure 25 : Algorithme de choix de stratégies d'assemblage (d'après [LAI, 00]) 69
Figure 26 : Données élaborées fictives pour l'illustration de la démarche d'unification 71
Figure 27 : Préparation des données élaborées de la figure 26 71
Figure 28 : Résultat de l'unification des trois données élaborées fictives de la figure 26 72
Figure 29 : Notations relatives à la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario 74
Figure 30 : Principe d'obtention de la durée d'un phénomène 77
Figure 31 : Illustration de deux scénarii ayant un phénomène en commun 83
Figure 32 : Principe de la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles 99
Figure 33 : Illustration de la sélection des Ph_i associés à F_1 et à une date fixée 102
Figure 34 : Liens entre les bases de données et la méthodologie 105
Figure 35 : Structuration de la base de données « agents environnementaux » 106
Figure 36 : Structuration de la base de données « fonctions » 109
Figure 37 : Schématisation des cinq types de réaction possibles - flux de passage 110
Figure 38 : Navigation dans la base de données « phénomènes » pour la réalisation d'une analyse qualitative 113
Figure 39 : Navigation dans la base de données « probabilités d'apparition » pour la réalisation d'une analyse quantitative des performances 115
Figure 40 : Représentation d'un phénomène dans le graphe événementiel des défaillances 119
Figure 41 : Extrait du graphe événementiel des défaillances d'une fenêtre 119
Figure 42 : Représentation des phénomènes et des portes logiques de l'arbre des défaillances 120
Figure 43 : Extrait d'un arbre des défaillances d'une fenêtre 120
Figure 44 : Représentations radar associées à l'analyse quantitative des performances 122
Figure 45 : Liens entre les propositions précédentes et l'étape d'analyse qualitative 124
Figure 46 : Graphes associés à l'exemple d'une fenêtre 125
Figure 47 : Formalisation de la démarche itérative de l'analyse qualitative d'un produit de construction 127
Figure 48 : Liens entre les propositions précédentes et l'étape d'analyse quantitative temporelle 128
Figure 49 : Cheminement de l'analyse quantitative temporelle 128
Figure 50 : Liens entre les propositions précédentes et l'étape d'analyse quantitative de la criticité 130

Figure 51 : Cheminement de l'analyse quantitative de la criticité 130
Figure 52 : Liens entre les propositions précédentes et l'étape d'analyse quantitative des performances 131
Figure 53 : Cheminement de l'analyse quantitative des performances 132
Figure 54 : Liens entre les propositions précédente et l'étape de présentation des résultats 133
Figure 55 : Liens entre les propositions et la méthodologie 137
Figure 56 : Cartographie de l'utilisation des applications pour l'illustration des étapes de la méthodologie 140
Figure 57 : Structure de la fenêtre étudiée 142
Figure 58 : Description des interfaces de la fenêtre 142
Figure 59 : Sous-graphe fonctionnel – flux de rayonnement infrarouge extérieur 144
Figure 60 : Scénarii génériques de la fenêtre fixe 147
Figure 61 : Sélection de scénarii de dégradation de la fenêtre 149
Figure 62 : Structure du mur en béton étudié 151
Figure 63 : Sélection de scénarii de dégradation du mur en béton 152
Figure 64 : Structure du mur en briques 153
Figure 65 : Sélection de scénarii de dégradation du mur en briques 155
Figure 66 : Structure du complexe mur en béton et fenêtre 156
Figure 67 : Stratégie de traitement des données utilisée pour la quantification temporelle de la fenêtre 160
Figure 68 : Préparation de la donnée 16, donnée unique pour le référentiel R3 163
Figure 69 : Exemple de fusion des données d-26 et d-27 selon la règle d'intersection de Dempster 164
Figure 70 : Courbe de consensus de l'intersection de l'EMCMM (des données 1 à 5) avec faible cohérence 165
Figure 71 : Courbe de consensus de l'intersection de l'EMCMM avec faible cohérence et ajout des données d-5 à d-9, d-16 à d-19 et d-30 165
Figure 72 : Scénario Sc_1 de diminution de l'absorption d'infrarouge de la fenêtre 166
Figure 73 : Représentations radar des intensités des catégories environnementales de la fenêtre 170
Figure 74 : Courbe de consensus des durées des Sc_5, Sc_7 et Sc_{10} et des données 1 à 10 du tableau 50 174
Figure 75 : Scénario de « chute de morceaux » du mur en béton 175
Figure 76 : Arbre des défaillances du scénario de « chute de morceaux » du mur en béton 176
Figure 77 : Courbe de consensus du scénario de « chute de morceaux » 180
Figure 78 : Hiérarchisation des scénarii par ordre de criticité et parallèle avec le classement de ces scénarii 190
Figure 79 : Scénarii du mur en briques étudiés 191
Figure 80 : Hiérarchisation et classement des scénarii du mur en briques par ordre de criticité 192
Figure 81 : Hiérarchisation et classement par ordre de criticité des scénarii des deux murs 193
Figure 82 : Positionnement des phénomènes du mur en béton sur un axe temporel 196
Figure 83 : Profils multi-performances du mur en béton à différents instants de sa vie en œuvre 200
Figure 84 : Positionnement des phénomènes du mur en brique sur un axe temporel 202
Figure 85 : Profils multi-performances du mur en briques à différents instants de sa vie en œuvre 202
Figure 86 : Proposition d'organisation du logiciel associé à la méthodologie 219
Figure 87 : Modèle de type 2 – imprécision sur le niveau de performance A 14
Figure 88 : Modèle de type 2 – imprécision sur le niveau de performance et l'état de dégradation A 14

Index des tableaux

Tableau 1 : Principales méthodes de Sûreté de Fonctionnement (extrait de l'annexe 1) 14
Tableau 2 : Définitions du risque 21
Tableau 3 : Exemples de grilles de cotation 25
Tableau 4 : Règles d'obtention de la criticité – approche avec sous-ensembles flous 26
Tableau 5 : Grille de cotation de l'effet de défaillance 27
Tableau 6 : Grille de cotation du niveau de probabilité d'apparition d'un mode de défaillance 27
Tableau 7 : Comparaison des essais de vieillissement des entités constructives 31
Tableau 8 : Dose-response functions de plusieurs métaux [HAA, 85] 33
Tableau 9 : Facteurs de la méthode des facteurs [ISO, 05a] 36
Tableau 10 : Comparatif des méthodes de traitement des données de durée de vie 40
Tableau 11 : Renseignements pour caractériser un référentiel de l'étude selon l'étape de la méthodologie menée 51
Tableau 12 : Exemple de référentiel de l'étude – phénomène de durcissement d'un joint butyle 51
Tableau 13 : Encadré de la méthode de transformation d'une donnée brute 54
Tableau 14 : Encadré de la méthode de traitement des données élaborées 56
Tableau 15 : Poids pCE_r associés aux critères CE_r d'évaluation de la qualité des données élaborées 66
Tableau 16 : Grille d'estimation des critères d'évaluation de la qualité des données élaborées 66
Tableau 17 : Affectation des masses pour deux preuves concordantes 68
Tableau 18 : Affectation des masses pour deux preuves conflictuelles 68
Tableau 19 : Réaffectation des masses des consensus selon la règle de Dempster (preuves conflictuelles) 68
Tableau 20 : Influence de la règle d'assemblage et du conflit sur l'affectation des masses (d'après [LAI, 00]) 69
Tableau 21 : Encadré de la méthode d'évaluation de la durée d'un scénario 73
Tableau 22 : Table d'estimation de l'indicateur d'environnement 79
Tableau 23 : Table d'estimation des sous-indicateurs liés à la qualité de conception 80
Tableau 24 : Indicateur de démarrage d'un phénomène 81
Tableau 25 : Table d'estimation de l'indicateur de cinétique 81
Tableau 26 : Table d'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène 82
Tableau 27 : Encadré de la méthode d'évaluation de la criticité 86
Tableau 28 : Grille d'évaluation du critère d'impact d'un phénomène sur la robustesse du produit 90
Tableau 29 : Grille d'évaluation du critère d'impact d'un scénario sur la maintenabilité du produit 91
Tableau 30 : Grille d'évaluation du critère d'impact d'un scénario sur la robustesse de l'ouvrage 92
Tableau 31 : Grille d'évaluation du critère d'impact d'un scénario sur la maintenabilité de l'ouvrage 92
Tableau 32 : Seuils de criticité 93
Tableau 33 : Exemple illustratif du classement de quatre scénarii 94
Tableau 34 : Poids des critères de criticité 96
Tableau 35 : Présentation de quatre scénarii fictifs à criticité majeure 97
Tableau 36 : Poids associés aux scénarii du tableau 35 97
Tableau 37 : Encadré de la méthode d'évaluation des performances fonctionnelles 98
Tableau 38 : Classes d'environnement associées au béton 107
Tableau 39 : Entête du tableau d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets d'une fenêtre 127
Tableau 40 : Liste des agents environnementaux du milieu extérieur de la fenêtre fixe 143
Tableau 41 : Fonctions de la fenêtre et composants / interfaces associé(e)s 143
Tableau 42 : Type de flux des catégories environnementales 144
Tableau 43 : Contacts entre les catégories environnementales et les composants et interfaces de la fenêtre 145
Tableau 44 : Extrait du tableau d'analyse du processus de la fenêtre 145
Tableau 45 : Fonctions du mur en béton et des composants / interfaces associé(e)s 152
Tableau 46 : Caractéristiques des composants du mur en briques 153
Tableau 47 : Fonctions du mur en briques et des composants / interfaces associé(e)s 154
Tableau 48 : Fonctions du complexe mur en béton et fenêtre et des composants / interfaces associé(e)s 157
Tableau 49 : Exemples de référentiels de la fenêtre fixe 159
Tableau 50 : Liste des données temporelles collectées au niveau du produit et de l'ensemble des scénarii 160
Tableau 51 : Liste des données temporelles collectées pour les référentiels R2 et R3 161
Tableau 52 : Transformation des données temporelles des tableaux 51 et 52 162

Tableau 53 : Masses de croyance des données temporelles des tableaux 51 et 52 162
Tableau 54 : Intervalles et masses de croyance résultant de la préparation des données 11 à 15 pour leur fusion 164
Tableau 55 : Durées obtenues ou déclarées des phénomènes du scénario de la figure 72 167
Tableau 56 : Durées et masses de croyance des scénarii de la fenêtre 169
Tableau 57 : Indicateur d'environnement de la fenêtre 170
Tableau 58 : Indicateur de qualité de conception de la fenêtre 171
Tableau 59 : Indicateur de démarrage de la fenêtre 172
Tableau 60 : Table d'estimation de l'indicateur de cinétique de la fenêtre 172
Tableau 61 : Indicateurs de cinétique des phénomènes de la fenêtre 172
Tableau 62 : Proposition arbitraire de correspondance entre valeurs linguistiques et numériques de la table d'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène 173
Tableau 63 : Probabilités d'apparition des phénomènes de la fenêtre 173
Tableau 64 : Eventualité d'apparition des scénarii de la fenêtre 173
Tableau 65 : Liste des scénarii élémentaires du scénario de « chute de morceaux » 176
Tableau 66 : Durées des phénomènes de carbonatation du mur en béton 178
Tableau 67 : Durées des phénomènes de corrosion du mur en béton 179
Tableau 68 : Durées et masses de croyance des scénarii élémentaires du scénario « chute de morceaux » 179
Tableau 69 : Probabilité d'apparition des scénarii élémentaires 180
Tableau 70 : Durées, masses de croyance et probabilités d'apparition des scénarii Sc_9 à Sc_{12} du mur en béton 181
Tableau 71 : Classement des fonctions du mur en béton 182
Tableau 72 : Degré de participation des composants du mur en béton à ses fonctions 182
Tableau 73 : Estimation de l'impact des phénomènes sur les fonctions du mur en béton 183
Tableau 74 : Grille d'évaluation de l'impact des phénomènes sur la robustesse du produit 183
Tableau 75 : Estimation de l'impact des phénomènes, par fonction, sur la robustesse du mur en béton 184
Tableau 76 : Impact des scénarii sur la robustesse du mur en béton - $I_{RP}Sc_j$ 185
Tableau 77 : Impact des scénarii sur la maintenabilité du mur en béton - $I_{MP}Sc_j$ 185
Tableau 78 : Impact des scénarii sur la robustesse du bâtiment - $I_{RO}Sc_j$ 186
Tableau 79 : Impact des scénarii sur la maintenabilité du bâtiment - $I_{MO}Sc_j$ 186
Tableau 80 : Gravité des scénarii du mur en béton - G^j 187
Tableau 81 : Récapitulatif des gravités, probabilités d'apparition et durées des scénarii du mur en béton 187
Tableau 82 : Seuils de criticité pour le classement des scénarii du mur en béton 188
Tableau 83 : Critères de durée des scénarii du mur en béton 189
Tableau 84 : Pondérations des critères de criticité des scénarii du mur en béton 190
Tableau 85 : Récapitulatif des attributs utiles au calcul de la criticité et criticité des scénarii du mur en béton 190
Tableau 86 : Récapitulatif des attributs utiles au calcul de la criticité et criticité des scénarii du mur en briques 192
Tableau 87 : Seuils de criticité pour le classement des scénarii du mur en briques 192
Tableau 88 : Caractéristiques intrinsèques du mur en béton associées à ses fonctions 195
Tableau 89 : Niveaux de performance associés aux couples {fonction ; phénomène} du mur en béton 196
Tableau 90 : Niveaux de performance des couples {F_k ; Ph_i} du mur en béton à t = 10, 20, 30, 40, 50 et 60 ans 199
Tableau 91 : Indicateur de cinétique d'évolution du profil multi-performance du mur en béton 201
Tableau 92 : Synthèse des démarches d'application 207
Tableau 93 : Démarche de transformation d'une donnée brute selon leur nature et leur format A 10
Tableau 94 : Illustration de la typologie proposée des formats des données brutes A 10
Tableau 95 : Correspondance entre les modèles des données brutes et ceux des données élaborées A 11
Tableau 96 : Liste des fonctions types A 13
Tableau 97 : Illustrations des données élaborées obtenues A 15
Tableau 98 : Synthèse des indicateurs, classes de critère, critères et mesures A 17
Tableau 99 : Calcul des critères de fiabilité fonctionnelle A 18
Tableau 100 : Données temporelles collectées au niveau du produit A 55
Tableau 101 : Scénarii du mur en briques étudiés A 56
Tableau 102 : Estimation de la qualité des données du mur en briques A 57
Tableau 103 : Table d'estimation de l'indicateur de cinétique de dégradation des phénomènes du mur en briques (déduite de la durée de vie du mur en briques obtenue pour le premier objectif) A 58
Tableau 104 : Cinétiques (déclarées), durées (déduites des cinétiques) des phénomènes et masses de croyances (déclarées) associées aux durées du mur en briques A 58
Tableau 105 : Durées des scénarii du mur en briques (obtenues par agrégation des durées des phénomènes) A 58

Tableau 106 : Indicateur d'environnement des phénomènes du mur en briques _____ *A 59*
Tableau 107 : Indicateur de conception des phénomènes du mur en briques _____ *A 59*
Tableau 108 : Indicateur de démarrage des phénomènes du mur en briques _____ *A 59*
Tableau 109 : Probabilité d'apparition des phénomènes du mur en briques _____ *A 60*
Tableau 110 : Probabilité d'apparition des scénarii du mur en briques _____ *A 60*
Tableau 111 : Synthèse des résultats de l'analyse quantitative temporelle du mur en briques _____ *A 60*
Tableau 112 : Classement des fonctions du mur en briques _____ *A 61*
Tableau 113 : Degré de participation des composants aux fonctions du mur en briques _____ *A 61*
Tableau 114 : Impact des phénomènes sur les fonctions du mur en briques _____ *A 61*
Tableau 115 : Impact des phénomènes sur la robustesse du mur en briques _____ *A 62*
Tableau 116 : Impact des scénarii sur la robustesse du mur en briques _____ *A 62*
Tableau 117 : Impact des scénarii sur la maintenabilité du mur en briques _____ *A 62*
Tableau 118 : Impact des scénarii sur la robustesse du bâtiment _____ *A 62*
Tableau 119 : Impact des scénarii sur la maintenabilité du bâtiment _____ *A 62*
Tableau 120 : Gravité des scénarii du mur en briques _____ *A 62*
Tableau 121 : Critère de durée, pondérations des critères de criticité et criticité des scénarii du mur en briques _____ *A 62*
Tableau 122 : Fonctions des niveaux de performance des couples {fonction ; phénomène} du mur en briques _____ *A 64*

Annexes

Annexe 1 : Principales méthodes de Sûreté de fonctionnement

Annexe 2 : Objectif et contenu des AMDEC du domaine industriel

Annexe 3 : Echelles du risque

Annexe 4 : Description des essais de vieillissement

Annexe 5 : Détail de la méthode de transformation d'une donnée brute

Annexe 6 : Méthode d'évaluation de la propension à la fiabilité des produits de construction [MAG, 01], [REJ, 95] et [REJ, 99]

Annexe 7 : Base de données « agents environnementaux »

Annexe 8 : Base de données « fonctions »

Annexe 9 : Arbre de choix de la stratégie de quantification temporelle

Annexe 10 : Sous-graphes fonctionnels de la fenêtre

Annexe 11 : Analyse du processus de construction de la fenêtre

Annexe 12 : Extrait de l'AMDE de la fenêtre

Annexe 13 : Référentiels et données temporelles de la fenêtre

Annexe 14 : Grilles de qualité des données temporelles de la fenêtre

Annexe 15 : Durées des phénomènes de la fenêtre fixe, stratégie d'obtention et indicateurs de qualité associés

Annexe 16 : Données temporelles du mur en béton

Annexe 17 : Détails des analyses quantitatives temporelle et de la criticité du mur en briques

Annexe 18 : Fonctions des niveaux de performances du mur en briques

Annexe 1

Principales méthodes de Sûreté de Fonctionnement

Nom de la méthode	Objectif principal	Typologies	Références
Méthode du Diagramme de Succès ou de Fiabilité (MDS/MDF)(1)	Evaluer le comportement d'un système de composants indépendants.	Quantitative Inductive Statique	[DES, 03] [LAI, 00] [ROL, 98] [ZWI, 96] [MOD, 93] [PAG, 80]
Arbre des Causes(2)	Organiser les éléments ayant contribué à un accident.	Qualitative Déductive Statique	[MOR, 05] [MOR, 02a]
Méthode de l'Arbre des Défaillances (MAD) ou des Défauts ou des Fautes(3)	Identifier les causes combinées à partir de la définition d'un événement redouté au niveau système.	Quantitative Déductive Statique	[MOR, 05] [IMD, 04] [DES, 03] [INE, 03] [MOR, 02a] [LAI, 00] [PER, 00] [ROL, 98] [HAD, 97] [ZWI, 96] [ZWI, 95] [MOD, 93] [VIL, 88] [PAG, 80] [LEM, 66]
Méthode de l'Arbre des Conséquences ou Arbres d'Evénements (MACQ/MAE)(4)	Décrire les scénarii d'accident à partir d'un événement initiateur.	Quantitative Inductive Statique	[MOR, 05] [IMD, 04] [DES, 03] [INE, 03] [MOR, 02a] [LAI, 00] [ROL, 98] [ZWI, 96] [ZWI, 95] [MOD, 93] [VIL, 88] [LEM, 66]
Méthode du Diagramme Causes-Conséquences (MDCC)(5)	Décrire les scénarii d'accident à partir d'événements initiateurs.	Quantitative Inductive et Déductive Statique	[DES, 03] [LAI, 00] [ZWI, 96] [ZWI, 95]
Analyse Préliminaire des Risques / Dangers (APR/APD)	Identifier les scénarios d'accident en présence de danger.	Qualitative Inductive Statique	[MOR, 05] [DES, 03] [INE, 03] [MOR, 02b] [LAI, 00] [ROL, 98] [HAD, 97] [ZWI, 96] [ZWI, 95]
Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)(6)	Identifier les effets des modes de défaillance des composants sur le niveau système.	Quantitative(7) Inductive Statique	[MOR, 05] [FAU, 04] [IMD, 04] [DES, 03] [INE, 03] [LAS, 01] [LAI, 00] [AFN, 98a] [CET, 98] [ROL, 98] [ZWI, 96] [ZWI, 95] [MOD, 93] [AFN, 86] [IEC, 85] [AST, 80] [PAG, 80] [LEM, 66] [ISD, 90]
Hazard and operability (HAZOP)	Identifier les dangers suite à une déviation des paramètres d'un procédé.	Qualitative Inductive Statique	[IMD, 04] [DES, 03] [INE, 03] [LAI, 00] [PER, 00] [ZWI, 96] [ZWI, 95]
Hazard Analysis Critical Control Point (HACCP)	Analyser les dangers qui pourraient se présenter dans l'entreprise, puis mettre en place des procédures de maîtrise et de surveillances préventives des points critiques spécifiques de son activité.	Qualitative Inductive Statique	[QUI, 99] [ROL, 98]
Hazard identification (Hazid)	Identifier les risques suite à l'occurrence d'un événement initiateur.	Qualitative Inductive Statique	[DES, 03]
Méthode des Combinaisons des Pannes Résumées (MCPR)	Regrouper les pannes ayant les mêmes effets et tenir compte des interactions entre systèmes indésirables.	Qualitative Déductive Statique	[LAI, 00] [HAD, 97] [ZWI, 96] [ZWI, 95] [VIL, 88]

Nom de la méthode	Objectif principal	Typologies	Références
Méthode de l'Espace des Etats (MEE)	Evaluer les principales caractéristiques de fiabilité et de disponibilité d'un système réparable.	Quantitative Inductive Dynamique	[MOR, 05] [IMD, 04] [LAI, 00] [ROL, 98] [ZWI, 96] [ZWI, 95] [VIL,88] [PAG, 80] [LEM, 66]
Processus de Markov	Evaluer le comportement dynamique d'un système réparable en présence de pannes.	Quantitative Inductive Dynamique	[DES, 03] [LAI, 00] [BER, 98] [ROL, 98] [ZWI, 96] [PAG, 80]
Réseaux de Pétri	Evaluer le comportement dynamique d'un système réparable en présence de pannes.	Quantitative Inductive Dynamique	[MOR, 05] [DES, 03] [LAI, 00] [ROL, 98]
Simulation de Monte Carlo	Modéliser finement le comportement de système complexe.	Quantitative - -	[DES, 03] [LAI, 00] [PAG, 80] [LEM, 66]
Analyses de zone	Mettre en évidence les problèmes résultant des interactions physiques entre éléments voisins ou de flux perturbateurs générés par des sources externes.	Qualitative Inductive Statique	[IMD, 04] [DES, 03] [VIL, 88]
Analyse temporelle	Identifier les interactions temporelles.	Qualitative - -	[DES, 03]
Analyses des causes communes de défaillance	Identifier les défaillances susceptibles d'entraîner plusieurs défaillances simultanées.	Qualitative Déductive Statique	[DES, 03]
Analyse des conditions insidieuses	Identifier les causes de fonctionnement anormal hors défaillance.	Qualitative Déductive Statique	[DES, 03]
Méthode de la Table de Vérité / Décision (MTV/MTD)	Identifier tous les états (fonctionnement ou panne) du système à partir de comportements binaires.	Quantitatif Inductif Dynamique	[ZWI, 96] [ZWI, 95] [LEM 66]
Méthode Nœud Papillon	Visualiser concrètement des scénarii d'accidents qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences au niveau des cibles identifiées.	Quantitative Déductif / Inductif Statique	[INE, 03]

(1) En anglais : Reliability Block Diagram Method.
(2) Souvent considérée à tort, selon Y. Mortureux [MOR, 2005], comme équivalente à la Méthode de l'Arbre des Défaillances.
(3) En anglais : Fault Tree Method. L'approche inverse, considérant le fonctionnement à la place de la défaillance, est la Success Tree Method.
(4) En anglais : Event Tree Method.
(5) En anglais : Cause-Consequence Diagram Method.
(6) En anglais : Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA).
(7) L'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE), sans l'analyse de Criticité, est une méthode qualitative.

Annexe 2

Objectif et contenu des AMDEC du domaine industriel

Nom	Objectif	Analyse de …
AMDE(C) produit	Identifier les éventuels points critiques du produit. Apporter des modifications pour améliorer le produit. Prévoir le plan de validation (essais, tests…).	La non satisfaction des fonctions attendues du produit. Les conséquences pour l'utilisateur.
AMDE(C) process ou procédé	Identifier les éventuels points critiques du procédé. Apporter des modifications pour améliorer le procédé. Prévoir le plan de contrôle ou de surveillance. Proposer éventuellement des modifications de conception du produit.	La génération de produits non-conformes aux spécifications. Les conséquences possibles pour l'utilisateur du produit et l'environnement de production.
AMDE(C) machine	Identifier les éventuels points critiques de la machine. Apporter les modifications nécessaires pour améliorer la machine. Prévoir le plan de validation de la machine (essais, tests, réalisation d'un pilote…) et/ou le plan de maintenance.	La non satisfaction des fonctions attendues de la machine. La génération de produits non-conformes aux spécifications. Les conséquences pour l'environnement de production.
AMDE(C) montage	Identifier les éventuels points critiques de la partie du procédé constitué des opérations manuelles. Apporter des modifications pour améliorer le montage. Prévoir le plan de contrôle ou de surveillance. Proposer éventuellement des modifications du produit.	La façon dont les opérations manuelles pourraient générer des produits non-conformes aux spécifications. Les conséquences possibles pour l'utilisateur et l'environnement de production.
AMDE(C) Contrôle	Identifier les éventuels points critiques du contrôle. Apporter des modifications pour améliorer le contrôle. Proposer éventuellement des modifications de conception du produit.	La génération de produits non-conformes aux spécifications. Les conséquences possibles pour l'utilisateur et l'environnement.
AMDE(C) service(1)	Identifier les éventuels points critiques du service. Apporter des modifications pour améliorer le service. Prévoir le plan de validation du service.	La façon dont les fonctions attendues du service pourraient ne pas être satisfaites. Les conséquences possibles pour le bénéficiaire ou le client.
AMDE(C) prestation de service(2)	Identifier les éventuels points critiques de la prestation de service. Apporter des modifications pour améliorer la prestation de service. Prévoir le plan de contrôle ou de surveillance. Proposer éventuellement des modifications du service.	La façon dont la prestation du service pourrait générer un service non-conforme aux attentes du bénéficiaire ou du client. Les conséquences possibles pour le bénéficiaire ou le client et l'ensemble de la prestation.

(1) Un service est considéré comme un produit immatériel répondant aux besoins d'un bénéficiaire ou d'un client.
(2) La prestation de service (l'activité nécessaire pour fournir ce service) pourra être assimilée à un procédé.

Annexe 3

Echelles du risque

Les différentes échelles de risques, à trois ou quatre niveaux, proposées dans des ouvrages relatifs à la gestion des risques ou des normes, sont présentées ci-après.

Méthode SOCOTEC de classification des risques d'éléments d'ouvrages [LES, 91] :

Cette méthode considère trois niveaux de risques :

- *risque courant* : aucune mesure n'est à prendre en plus du plan de prévention défini à partir du classement des éléments d'ouvrage,
- *risque notable* : il n'est pas possible de ramener ce risque au cas précédent par une modification limitée et acceptable du projet ; ce niveau de risque conduit normalement à la procédure de point critique (phase de travaux avec vérifications par l'exécutant),
- *risque considérable* : il n'est pas possible de ramener ce risque à l'un des cas précédents par une modification limitée et acceptable du projet ; ce niveau de risque entraîne une procédure de point d'arrêt (phase de travaux nécessitant le quitus d'un contrôleur différent de l'exécutant).

Projet de norme PrEN 50-126 [HAD 97] :

Il propose quatre niveaux :

- *risques intolérables* : doivent être éliminés,
- *risques non souhaitables* : ne peuvent être acceptés, avec l'accord du responsable sécurité, que si l'on ne peut pas réduire le risque,
- *risques tolérables* : acceptables, avec l'accord du responsable sécurité, et moyennant des précautions appropriées,
- *risques négligeables* : acceptables, avec l'accord du responsable sécurité.

Projet de norme internationale CEI 65A SEC 123A [HAD, 97] :

Il suggère une échelle à quatre niveaux semblable au projet de norme PrEN 50-126, mais incluant un point de vue financier (par exemple, *risques non souhaitables* : ne sont tolérables que dans la mesure où l'on ne peut pas réduire les risques, ou si le coût de réduction des risques est exagérément élevé).

Projet de norme CEI 56 SEC 410 [HAD, 97] :

Les niveaux présentés dans ce projet de norme s'apparentent à ceux proposés dans la norme CEI 65A SEC 123A, avec des intitulés différents : « *haut risque* », « *risque intermédiaire* », « *faible risque* » et « *risque insignifiant* ».

Projet de norme du ministère de la défense britannique Int Def Stan 00-56 et norme américaine MIL-STD-882C [HAD, 97] :

Ce projet de norme définit quatre niveaux de risque :

- *risques inacceptables* – niveau A,
- *risques non souhaitables* – niveau B1 : peuvent exceptionnellement être acceptables avec l'accord de certaines autorités compétentes,
- *risques acceptables* – niveau B2 : avec l'accord de certaines autorités compétentes,
- *risques acceptables* – niveau C.

Niveaux de risques liés à la gravité de l'événement redouté [DES, 03] et [DES, 95] :

Cet ouvrage relatif à la gestion des risques, suggère que la hiérarchisation des risques soit directement liée à la gravité de l'événement redouté :

- *risque catastrophique* : dommage important sur l'homme (mort, invalidité, blessures graves), destruction totale du système et / ou de son environnement,
- *risque critique (ou grave)* : blessures graves non permanentes, destruction partielle ou indisponibilité importante du système, arrêt d'un projet ou d'une activité,
- *risque significatif (ou majeur)* : blessures légères, arrêt de la mission sans destruction ou indisponibilité importante,
- *risque mineur* : perte de redondance, perte de confort.

Remarque : un point critique est une défaillance qui a une valeur de criticité supérieure au seuil de criticité fixé par le concepteur.

Annexe 4

Description des essais de vieillissement

La deuxième partie de l'ISO 15686 [ISO, 05b] propose de classer les essais de vieillissement des entités constructives selon leur durée d'exposition :

1. **exposition de longue durée** : la durée d'exposition est semblable à la durée de vie en service de l'entité constructive étudiée ;
2. **exposition de courte durée** : la durée d'exposition est très nettement inférieure à la durée de vie en service de l'entité considérée. L'European Organisation for Technical Approvals (EOTA) stipule que la durée d'exposition doit être supérieure au dixième de la durée de vie de conception et ne doit en aucun cas être inférieure au résultat de l'équation suivante [EOT, 99] :

   Durée d'exposition ≥ Durée de vie de conception / 10 (*cas recommandé*)

   Durée d'exposition > Durée de vie de conception / $10^{1,5}$ (*cas exceptionnel*) **[53]**

   Par exemple, pour une durée de vie de conception de 100 ans, la durée d'exposition doit être supérieure à 10 ans et elle ne doit en aucun cas être inférieure à 3 ans et 2 mois.

1) Essais de vieillissement en exposition de longue durée

Exposition sur le terrain :

Ce type d'essai consiste à placer une entité constructive dans un environnement climatique réel, dont les principales caractéristiques (pluviométrie, température, ensoleillement, pollution) sont mesurées parallèlement.

Le suivi des dégradations de plusieurs types de peinture de protection de mur en briques, qui fait l'objet d'un programme de recherche mené par le Building Environment Sciences and Technology (BEST) du Politecnico di Milano (Milan – Italie) et l'Univserity of Applied Sciences of Southern Switzeland (Lugano – Suisse) est un exemple d'essai de vieillissement en exposition sur le terrain [DAN, 05].
Un second exemple est le suivi des propriétés optiques de double vitrages gazochrome et électrochrome dans le cadre du projet SWIFT (Switchable Facade Technology) [PLA, 03]. Les essais ont été réalisés pour quatre sites d'exposition, à l'Oxford Brookes University (Oxford – Royaume Uni), au Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Freiburg – Allemagne), au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (Grenoble – France) et au National Institute for Chemistry (Lubiana – Slovénie).

Inspection des bâtiments :

Il s'agit pour ce type d'essai de relevés visuels ou instrumentés (jauges de mesure, photographie, etc.) à des instants ponctuels de la vie en œuvre des bâtiments.
La nature des inspections dépend du type de bâtiment :

- **immeubles collectifs :** le carnet d'entretien rendu obligatoire par l'article 78 de la loi n°2000-1208 relative à la Solidarité et au Renouvellement Urbain du 13 décembre 2000 (loi dite SRU) permet de connaître les travaux et les entretiens des équipements communs et de sécurité réalisés dans ce type d'immeuble [LEM, 00]. De plus, l'article L 111-6-2 du Code de la Construction et de l'Habitat stipule que « toute mise en copropriété d'un immeuble construit depuis plus de quinze ans est précédée d'un diagnostic technique portant constat de l'état apparent de la solidité du clos et du couvert et de celui de l'état des conduites et canalisations collectives ainsi que des équipements communs et de sécurité » ;
- **immeubles recevant du public :** les inspections des équipements de sécurité (extincteurs, affichages des issues de secours, alarmes, extracteurs de fumées, etc.) et des ascenseurs sont réglementées et régulières.

En France, les démarches systématiques réglementées d'inspection de l'état de la structure des bâtiments et de l'état de ses produits (autres que les équipements de sécurité et les ascenseurs) se mettent progressivement en place, mais restent encore rare.

Exposition dans des bâtiments expérimentaux :

Ce type d'essais consiste à placer les produits dont on veut étudier le comportement dans le temps dans des bâtiments conçus spécialement à cet effet ; il ne s'agit pas de bâtiments en service.
Dans ce cas, les sollicitations étudiées sont les conditions climatiques et éventuellement des conditions d'usage reproduites.

Exposition en service :

Les essais de vieillissement en exposition longue durée en service permettent d'évaluer la durée de vie de produits et de bâtiments dans des conditions réelles de service.
Ce type d'essai est recommandé lorsque les produits seront en service fortement sollicités par les utilisateurs / occupants.

2) Essais de vieillissement en exposition de courte durée

L'objectif des essais de vieillissement en exposition de courte durée est de pouvoir mesurer relativement rapidement les variations des propriétés mécano-physico-chimiques rencontrées dans des essais de vieillissement en exposition de longue durée.

Exposition de courte durée accélérée :

Une exposition accélérée revient soit à augmenter la concentration des agents environnementaux dont on veut étudier l'influence sur un matériau ou un produit spécifique (par exemple, le nombre d'heure d'éclairement dans une enceinte weatherometer) soit à accélérer les cycles de sollicitations climatiques (par exemple, les cycles gel-dégel dans des enceintes).
Ce type d'essai est réalisé lorsque les mécanismes de dégradation et les paramètres les influençant ont été identifiées soit par des essais préliminaires soit par des expositions de longue durée de produits identiques ou comparables.

Exposition en service de courte durée :

Ce type d'essai est mené (dans des bâtiments en service) lorsque les mécanismes de dégradation que l'on veut suivre sont connus pour apparaître rapidement.

Il existe des normes nationales (par exemple, la NF EN 14147 [AFN, 04a] relative à la détermination de la résistance au vieillissement accéléré au brouillard salin de pierres naturelles) et internationales (par exemple, l'ISO 4892-1 [ISO, 99] relative aux méthodes d'exposition à des sources lumineuses de laboratoire des plastiques) décrivant les démarches à suivre pour réaliser les essais de vieillissement. Ces normes décrivent notamment les types d'agents environnementaux qui doivent être étudiés en fonction des matériaux considérés. Elles sont en grande majorité relatives aux matériaux.

Annexe 5

Détail de la méthode de transformation d'une donnée brute

I. Description de la méthode

La démarche de transformation d'une donnée brute en une donnée élaborée comprend trois étapes :

a) choix d'un modèle non normalisé,
b) estimation des paramètres de ce modèle,
c) normalisation.

Selon le format de la donnée brute considérée, le modèle ou ses paramètres peuvent être connus, les variables peuvent également être normalisées ; par conséquent certaines étapes de la démarche de transformation sont déjà réalisées. Les étapes à réaliser selon le format de la donnée brute considérée sont présentées dans le tableau 93 :

Donnée brute			Etapes à réaliser		
Modèle	Paramètres	Variables	1.	2.	3.
Non connu	Non connus	Non normalisées	✓	✓	✓
		Normalisées	✓	✓	
Connu	Non connus	Non normalisées		✓	✓
		Normalisées		✓	
	Connus	Non normalisées			✓
		Normalisées			

Tableau 93 : Démarche de transformation d'une donnée brute selon leur nature et leur format

a) Choix d'un modèle non normalisé

Nous considérons que toute donnée brute peut être modélisée selon la typologie suivante :

- des modèles analytiques :
  - continu,
  - continu par morceaux,
- des modèles « ensemblistes » :
  - ensemble de points,
  - ensemble d'intervalles,
  - dire d'expert.

Cette typologie est illustrée, selon l'étape de la méthodologie considérée, au tableau 94.

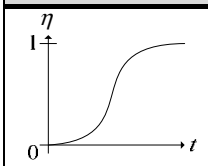
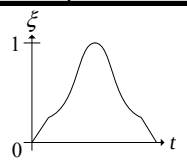
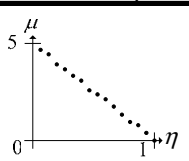
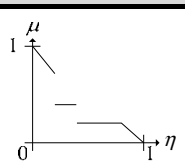
Modèles analytiques		Modèles « ensemblistes »		
Continu	Continu par morceaux	Ensemble de points	Ensemble d'intervalles	Dire d'expert
				A la date t_3 la probabilité d'apparition vaut au moins 0,3 sur [0, 1]
AQT	*AQT*	*AQP*	*AQP*	*AQT*

Tableau 94 : Illustration de la typologie proposée des formats des données brutes

Nous considérons que tout modèle (analytique ou « ensembliste ») associé à une donnée brute peut être transformé en l'un des deux modèles alloué à la donnée élaborée suivants :

- type 1 : modèle analytique,
- type 2 : modèle analytique combiné à un sous-ensemble flou.

Remarque : un modèle de type 1 peut être un modèle analytique continu, lorsque la donnée élaborée comporte une seule fonction, ou continu par morceaux, lorsqu'elle est constituée de plusieurs fonctions.

La correspondance que nous proposons entre la typologie des données brutes et ces deux types de modèles de données élaborées, est présentée au tableau 95.

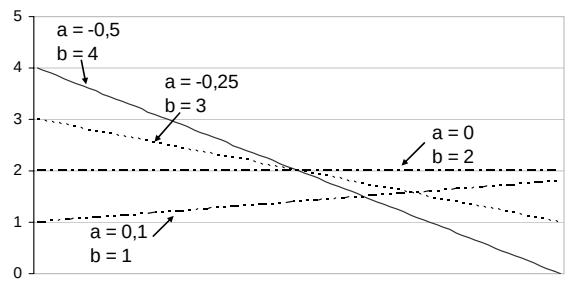
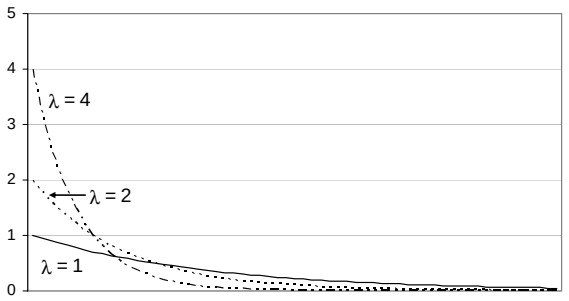
Modèle D_{brute} \ Modèle $D_{élab}$		Type 1	Type 2
Modèles analytiques	Continu	✓	
	Continu par morceaux	✓	
Modèles « ensemblistes »	Ensemble de points	✓	
	Ensemble d'intervalles	✓	
	Dire d'expert		✓

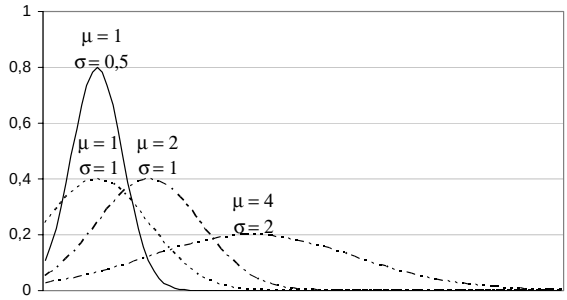
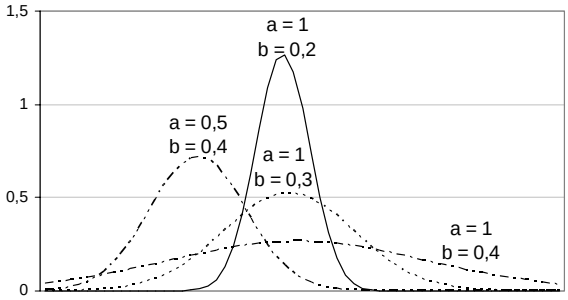
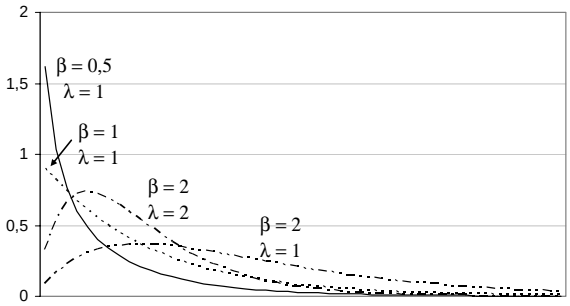
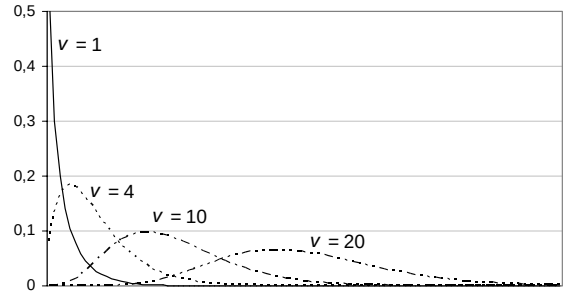
Tableau 95 : Correspondance entre les modèles des données brutes et ceux des données élaborées

Le choix d'un modèle est différent selon le type de modèle de la donnée brute et donc celui de la donnée élaborée. Nous traitons d'abord le cas du modèle de type 1 (modèle analytique) puis le cas du modèle de type 2 (modèle analytique combiné à un sous-ensemble flou).

Cas du modèle pour une donnée élaborée de type 1 :

Notre démarche consiste à choisir dans une liste de fonctions types, celle qui est la plus représentative du modèle de la donnée brute considérée. Le tableau 96 présente une liste, non exhaustive, de fonctions types.

Nom	Caractéristiques		Illustrations
Droite	Fonction mathématique		
	$f(x) = a \cdot x + b$		
	Paramètres : a et b		
Loi exponentielle	Fonction de densité		
	$f_X(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x}$		
	Fonction de répartition		
	$F_X(x) = 1 - e^{-\lambda x}$		
	Paramètres : $\lambda > 0$		
	Espérance	Variance	
	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$	

Loi normale	Fonction de densité $f_X(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$ Fonction de répartition $F_X(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}\cdot dt$ Paramètres : μ et σ ($\sigma > 0$) Espérance : μ ; Variance : σ^2	
Loi log normale	Fonction de densité $f_X(x)=\frac{1}{b\sqrt{2\pi}}\cdot\frac{1}{x}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x-a)}{b}\right)^2}$ Fonction de répartition $F_X(x)=\frac{1}{b\sqrt{2\pi}}\int\frac{1}{t}\cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t-a)}{b}\right)^2}\cdot dt$ Paramètres : a et b (b > 0) Espérance : $e^{\left(a+\frac{b^2}{2}\right)}$; Variance : $e^{2a+b^2}\cdot\left(e^{b^2}-1\right)$	
Loi gamma	Fonction de densité $f_X(x)=\frac{1}{\Gamma(\beta)}\cdot\lambda^{\beta}\cdot x^{\beta-1}\cdot e^{-\lambda x}$ Fonction de répartition $F_X(x)=\frac{\Gamma(\beta,\lambda x)}{\Gamma(\beta)}$ Paramètres : $\lambda > 0$et $\beta > 0$ Espérance : $\frac{\beta}{\lambda}$; Variance : $\frac{\beta}{\lambda^2}$	
Loi du khi deux	Fonction de densité $f_X(x)=\frac{1}{2^{\frac{v}{2}}\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)}\cdot x^{\frac{v-2}{2}}\cdot e^{-\frac{x}{2}}$ Fonction de répartition $F_X(x)=\frac{1}{2^{\frac{v}{2}}\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)}\int_{-\infty}^{x} t^{\frac{v-2}{2}}\cdot e^{-\frac{t}{2}}\cdot dt$ Paramètres : v entier positif Espérance : v ; Variance : $2v$	

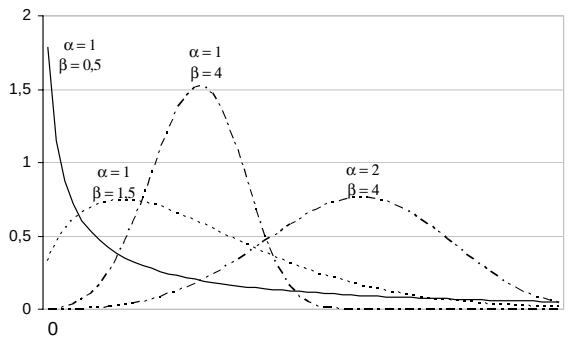
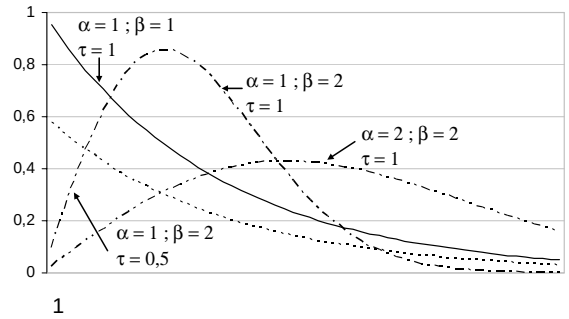
Loi de Weibull standard	Fonction de densité $f_X(x) = \frac{\beta \cdot x^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}$ Fonction de répartition $F_X(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}$ Paramètres : α et β (échelle et forme) Espérance: $\alpha \cdot \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$ Variance: $\alpha^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right]^2\right]$	
Loi de Weibull à trois paramètres	Fonction de densité $f_X(x) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-\tau}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{\left[-\left(\frac{x-\tau}{\alpha}\right)^\beta\right]} \quad x \geq \tau$ Fonction de répartition $F_X(x) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{x-\tau}{\alpha}\right)^\beta\right]} \quad x \geq \tau$ Paramètres : α, β et τ (échelle, forme et position) Espérance: $\tau + \alpha \cdot \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$ Variance: $\alpha^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right]^2\right]$	
Pour de plus amples informations concernant les différents modèles de Weibull, le lecteur intéressé pourra se référer à l'ouvrage de D. N. P. Murthy, M. Xie et R. Jiang [MUR, 04]		

Tableau 96 : Liste des fonctions types

Il existe de nombreuses fonctions de Weibull qui dérivent de la fonction de Weibull standard à deux ou à trois paramètres [MUR, 04]. De plus, de nombreuses études fondamentales, telles que celles développées par [VAN, 05], [WU, 05], [MAY, 05] attestent de la capacité des fonctions de Weibull à caractériser les fonctions d'évolution de multiples matériaux. C'est pourquoi nous insistons plus particulièrement sur ces fonctions, dans la mesure où en faisant varier leurs paramètres, elles permettent de représenter la plupart des fonctions caractérisant nos données brutes.

Cas du modèle pour une donnée élaborée de type 2 :

Dans notre contexte, les sous-ensembles flous permettent de traduire l'incertitude et l'imprécision attachées aux dires d'experts.
Nous distinguons deux cas, lorsque l'incertitude et l'imprécision portent sur :

1. une seule des deux variables de la donnée brute,
2. les deux variables de la donnée brute.

1) Imprécision sur une variable :

Nous traitons ce cas de figure à l'aide, d'une part, d'un modèle analytique sur l'intervalle renseigné et d'autre part, d'une fonction d'appartenance, $g_{ap}(X)$, associée à la variable entachée d'imprécision.

Cette démarche est illustrée à la figure 87 à partir de l'exemple de dire d'expert, dans le cadre de l'analyse quantitative des performances, formalisé par : « pour un état de dégradation (η) compris entre 0,4 et 0,6 sur une échelle de [0 ; 1] le niveau de performance (μ) vaut de 3 à 6 mais peut varier de 2 à 7 sur [0 ; 10] ». L'imprécision porte ici sur le niveau de performance.

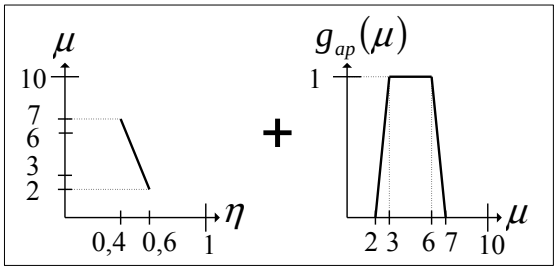


Figure 87 : Modèle de type 2 – imprécision sur le niveau de performance

2) Imprécision sur les deux variables :

La différence entre le premier cas de figure et le second réside dans l'attribution d'une fonction d'appartenance à chacune des deux variables présentant des imprécisions.
La démarche proposée est illustrée à la figure 88 pour l'exemple de dire d'expert, dans le cadre de l'analyse quantitative des performances, formalisé par : « pour un état de dégradation (η) d'environ 0,5 sur [0 ; 1] le niveau de performance (μ) vaut de 3 à 6 mais peut varier de 2 à 7 sur [0 ; 10] ». L'imprécision porte ici sur le niveau de performance mais également sur l'état de dégradation.

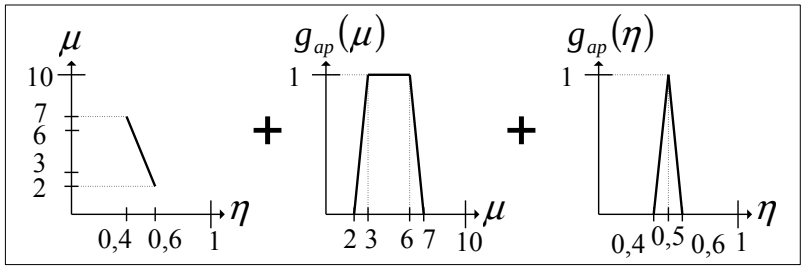


Figure 88 : Modèle de type 2 – imprécision sur le niveau de performance et l'état de dégradation

b) Estimation des paramètres du modèle

Lorsqu'un modèle a été choisi, c'est-à-dire que le type de fonction le plus représentatif d'une donnée brute a été choisi, il est nécessaire d'en estimer les paramètres.
Dans le cas d'une fonction de Weibull standard à deux paramètres (*cf.* tableau 96), il s'agit d'estimer les valeurs prises par le paramètre d'échelle, α, et le paramètre de forme, β.
Ces valeurs sont obtenues en appliquant l'une des méthodes d'estimation des paramètres classiques (méthode du maximum de vraisemblance, méthode des moments).

c) Normalisation

A cette étape, à chaque donnée brute nous avons associé un modèle non normalisé et ses paramètres. Pour pouvoir exploiter ces modèles ensemble, il est nécessaire qu'ils aient un format commun, c'est la raison pour laquelle nous les normalisons sur l'échelle [0 ; 1].
L'obtention du modèle analytique normé, $M_{norm}\left(\overline{X}\right)$, d'un modèle analytique $M(x)$ peut être formalisé ainsi :

$$\overline{Y} = M_{norm}\left(\overline{X}\right) \quad \textbf{[54]}$$

c'est-à-dire :

$$\forall x \text{ et } \forall y \qquad \bar{x} = \frac{x}{\max(x) - \min(x)} \text{ et } \bar{y} = M_{norm}(\bar{x}) = \frac{M(\bar{x})}{\max(M(\bar{x})) - \min(M(\bar{x}))} \qquad [\,55\,]$$

Remarques : nous avons choisi de définir les fonctions d'appartenance sur [0,1], elles sont donc déjà normalisées. Lorsque l'une des deux variables d'un modèle analytique est la variable de temps, nous ne la normalisons pas ; c'est le cas pour les donnée brutes associées à l'analyse quantitative temporelle ; alors seules la variable d'état de dégradation et la variable de probabilité d'apparition sont normalisées.

II. Résultats de la méthode de transformation d'une donnée brute

Le tableau 97 regroupe les résultats obtenus en appliquant la méthode de transformation aux données brutes fictives présentées au tableau 94.

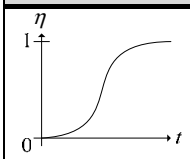
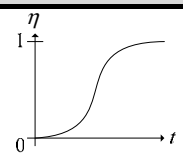
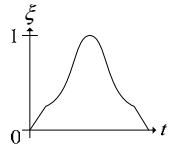
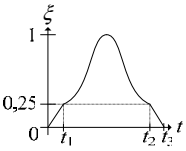
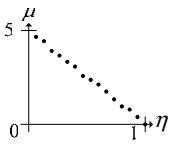
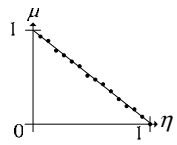
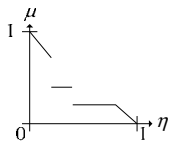
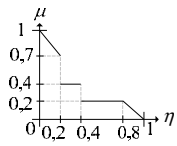
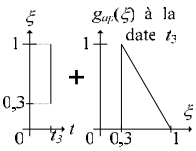
Représentation des données : brutes	Représentation des données : élaborées	Résultats	
		état de dégradation en fonction du temps	modèle : type 1
		$\eta = M_{norm}(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$ avec $\alpha = 1$ et $\beta = 2{,}4$	
		probabilité d'apparition en fonction du temps	modèle : type 1
		$\xi = M_{norm}(t) = (0{,}25 \cdot t)/t_1$ sur $[0\,;\,t_1]$; $\xi = \left(1/\sigma\sqrt{2\pi}\right) \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$ sur $[t_1\,;\,t_2]$ avec $\mu = 1{,}5$ et $\sigma = 0{,}4$; $\xi = (0{,}25 \cdot (t_3 - t)/(t_3 - t_2))$ sur $[t_2\,;\,t_3]$	
		niveau de performance en fonction de l'état de dégradation	modèle : type 1
		$\mu = M_{norm}(\eta) = 1 - \eta$	
		niveau de performance en fonction de l'état de dégradation	modèle : type 1
		$\mu = M_{norm}(\eta) = 1 - 1{,}5 \cdot \eta$ sur $[0\,;\,0{,}2]$; $\mu = 0{,}4$ sur $[0{,}2\,;\,0{,}4]$; $\mu = 0{,}25$ sur $[0{,}4\,;\,0{,}8]$; $\mu = 1 - \eta$ sur $[0{,}8\,;\,1]$	
A la date t_3 la probabilité d'apparition vaut au moins 0,3 sur [0 ; 1]		Probabilité d'apparition en fonction du temps	modèle : type 2
		La fonction d'appartenance $g_{ap}(\xi)$ représente les incertitudes liées au dire d'expert. Dans ce cas, le modèle analytique ne doit pas être dissocié de la fonction d'appartenance. En effet, la valeur $\eta = 0{,}7$ à t_3, n'a pas la même crédibilité que la valeur $\eta = 0{,}3$ à t_3.	

Tableau 97 : Illustrations des données élaborées obtenues

Remarque : les valeurs numériques prises par les modèles et / ou leurs paramètres dans le tableau 97 sont réelles.

III. Synthèse de la méthode de transformation d'une donnée brute

La méthode de transformation d'une donnée brute en une donnée élaborée permet d'obtenir un format d'exploitation commun à un ensemble de données multi-sources (études fondamentales, études expérimentales, dires d'expert, retours d'expérience). Elle consiste à choisir le modèle le plus représentatif d'une donnée brute, puis à estimer les paramètres caractéristiques du modèle et enfin, à le normaliser.

Annexe 6

Méthode d'évaluation de la propension à la fiabilité des produits de construction [MAG, 98], [REJ, 95] et [REJ, 99]

La méthode d'évaluation de la **propension à la fiabilité** des produits de construction donne une évaluation qualitative sur [0 ; 100] à partir de quatre **indicateurs** :

- $\boldsymbol{A_{fu}}$ **– fiabilité fonctionnelle** : mesure de la répartition des fonctions assurées par le produit dans ce produit, cette mesure est basée sur le modèle fonctionnel du produit ; un exemple de modèle fonctionnel pour le mur en briques détaillé en partie C de ce mémoire est présenté dans [MAG, 98],
- $\boldsymbol{A_{fa}}$ **– fiabilité d'exécution** : mesure de la probabilité de bonne exécution du produit en phase de mise en œuvre,
- $\boldsymbol{A_{in}}$ **– fiabilité inhérente** : mesure des risques de défaillance précoce des composants due aux sollicitations des agents environnementaux,
- $\boldsymbol{A_{co}}$ **– fiabilité de compatibilité** : mesure du nombre d'incompatibilités chimiques et physiques entre composants du produit.

La propension à la fiabilité d'un produit, $\boldsymbol{A_g}$, est donnée par l'équation suivante :

$$A_g = \frac{A_{fu} + A_{fa} + A_{in} + A_{co}}{4} \quad \textbf{[56]}$$

Chacun des quatre indicateurs (A_{fu}, A_{fa}, A_{in}, A_{co}) est évalué à partir d'un ensemble de **mesures** $\boldsymbol{P_i}$, de **critères** $\boldsymbol{I_i}$; les critères étant regroupés en **classe de critères** $\boldsymbol{I_j}$. Les relations existant entre les mesures, les critères, les classes de critère et les indicateurs sont fournies par les équations suivantes :

$$I_i = \left(1 - \frac{P_i}{100}\right) \times 100 \quad \textbf{[57]}$$

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} I_i}{n} \quad \textbf{[58]}$$

$$A_{(fu,fa,in,co)} = \frac{\sum_{j=1}^{k} I_j}{k} \quad \textbf{[59]}$$

Où n désigne le nombre de critères d'une classe et k représente le nombre de classes de critère d'un indicateur.

Le tableau 98 détaille les mesures, les critères et les classes de critères associées à chaque indicateur de la méthode d'évaluation de la propension à la fiabilité des produits de construction.

Indicateur		Classe de critère		Critère		Mesure
Réf.	Nom	Réf.	Nom	Réf.	Nom	Réf.
A_{fu}	Fiabilité fonctionnelle	I_A	Simplicité du modèle	I_{A1}	Simplicité structurelle	P_{A1}
				I_{A2}	Simplicité fonctionnelle	P_{A2}
				I_{A3}	Simplicité d'emplacement	P_{A3}
		I_B	Fatigue fonctionnelle	I_{B1}	Fatigue moyenne	P_{B1}
				I_{B2}	Fatigue critique	P_{B2}
				I_{B3}	Variabilité de la fatigue	P_{B3}
				I_{B4}	Equilibre de la fatigue	P_{B4}
		I_C	Distribution fonctionnelle	I_{C1}	Distribution en série	P_{C1}
				I_{C2}	Distribution en parallèle	P_{C2}
A_{fa}	Fiabilité d'exécution	I_M	Diversité des matériaux	Idem à la classe		N_M
		I_O	Complexité des produits	Idem à la classe		N_O
		I_R	Complexité des liaisons	Idem à la classe		P_R
A_{in}	Fiabilité inhérente	I_{VX}	Variabilité inhérente selon la direction X	I_{TX}	Variabilité thermique inhérente selon la direction X	P_{TX}
				I_{HX}	Variabilité hydrique inhérente selon la direction X	P_{HX}
		I_{VY}	Variabilité inhérente selon la direction Y	I_{TY}	Variabilité thermique inhérente selon la direction Y	P_{TY}
				I_{HY}	Variabilité hydrique inhérente selon la direction Y	P_{HY}
		I_{VZ}	Variabilité inhérente selon la direction Z	I_{TZ}	Variabilité thermique inhérente selon la direction Z	P_{TZ}
				I_{HZ}	Variabilité hydrique inhérente selon la direction Z	P_{HZ}
A_{co}	Fiabilité de comptabilité	I_{ph}	Incompatibilité physique	Idem à la classe		P_{ph}
		I_{ch}	Incompatibilité chimique	Idem à la classe		P_{ch}

Tableau 98 : Synthèse des indicateurs, classes de critère, critères et mesures

Le tableau 99 présente les calculs des critères permettant d'évaluer la fiabilité fonctionnelle d'un produit de construction.

Critère		Mesure	Calcul
Réf.	Nom	Réf.	
I_{A1}	Simplicité structurelle	P_{A1}	Nombre d'emplacement de fonctions
I_{A2}	Simplicité fonctionnelle	P_{A2}	Nombre de fonctions analytiques distinctes
I_{A3}	Simplicité d'emplacement	P_{A3}	Nombre de fonction de base n'ayant qu'un seul emplacement
I_{B1}	Fatigue moyenne	P_{B1}	Nombre de fonctions analytiques réparties sur plusieurs emplacement
I_{B2}	Fatigue critique	P_{B2}	Nombre maximum de fonctions analytiques positionnées sur un même emplacement
I_{B3}	Variabilité de la fatigue	P_{B3}	Dispersion des fonctions analytiques $P_{B3} = P_{B1} - \left(\frac{P_{B2} - P_{B\min}}{2} \right)$ **[60]** $P_{B\min}$ est le nombre minimum de fonctions analytiques positionnées sur un même emplacement
I_{B4}	Equilibre de la fatigue	P_{B4}	Symétrie de la répartition des fonctions

I_{C1}	Distribution en série	P_{C1}	Nombre de fonctions analytiques correspondant à une même fonction de base, affectées à deux ou plus emplacements différents : $P_{C1} = \sum_{i=1}^{r} n_{si}$ **[61]** r : nombre fonctions de base associées à la classe du produit
I_{C2}	Distribution en parallèle	P_{C2}	Nombre de fonctions analytiques correspondant à une même fonction de base, répétées sur différents emplacements : $P_{C2} = \sum_{i=1}^{r} n_{pi}$ **[62]** r : nombre de fonctions de base associées à la classe du produit

Tableau 99 : Calcul des critères de fiabilité fonctionnelle

Les fonctions analytiques et les fonctions de base de la classe de produit « mur extérieur non porteur » sont présentées dans [MAG, 98].

Le lecteur intéressé pourra se reporter à [REJ, 95] et [REJ, 99] pour les calculs des critères associés aux trois autres indicateurs de fiabilité.

Annexe 7

Base de données « agents environnementaux »

La base de données ci-dessous est un extrait de la base de données complète.

Catégorie environnementale	Composante environnementale	Unité de mesure	Référentiel de classification
Liquides	Eau	L	Béton [AFN, 05]
	NaCl dissout (embrun marin)	mg / L	
	Sels de déverglaçage	mg / L	
	Détergents	L	
	Solvants	L	
	Huiles-graisses	-	
	Polluants (Oxydes d'azote dissous, oxydes de soufre dissous, oxydes de carbones, hydrogène sulfuré dissous, etc.)	mg / L	
Vapeurs	Degré d'humidité élevé (humidité)	%	Béton [AFN, 05] Bois [AFN, 97]
	Degré d'humidité bas (sécheresse)	-	
Températures	Elevée	°C	Béton [AFN, 05] Bois [AFN, 97]
	Basse	°C	
	Cyclique (cycles gel/dégel)	nb jour	
	Chocs thermiques	Δ T°C	
Bruits	Bruit aérien intérieur	dB	Matériaux isolants RT 2005
	Bruit aérien extérieur	dB	
	Bruit d'impact au sol	dB	
	Bruit d'équipement	dB	
Actions mécaniques	Charge ponctuelle / répartie	N	Béton, acier, bois, mixte acier-bois Eurocodes
	Charge statique / dynamique	N	
	Effort de compression	N	
	Effort de traction	N	
	Effort de cisaillement	N	
	Pression	N / m²	
	Vibration	-	
	Séisme	magnitude	
	Vent	N / m² - km / h	
	Frottement	-	
	Chocs durs	-	
	Chocs mous	-	
Précipitations	Grêle	-	Béton, acier, bois, mixte acier-bois Eurocodes
	Neige	-	
	Pluie	mm / jour	
	Brouillard	-	

Annexe 8

Base de données « fonctions »

La base de données ci-dessous est un extrait de la base de données complète.

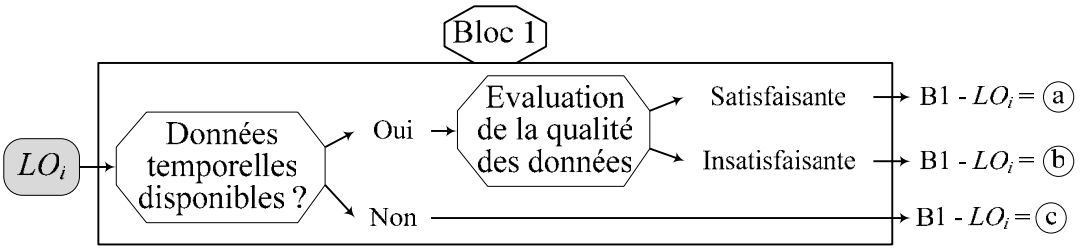
Type de fonction	Catégorie environnementale	Désignation de la fonction
Stopper	Liquides	Etre étanche aux liquides
	Vapeurs	Etre étanche aux vapeurs
	Gaz	Etre étanche au gaz
	Electricité	Etre isolant
	Radiations	Etre opaque (U.V., éclairage artificiel)
		Stopper le rayonnement infrarouge (source de chaleur)
		Stopper les radiations nucléaires
	Températures	Stopper les températures élevées
		Stopper les températures basses
	Animaux / Bactéries	Etre étanche aux animaux / bactéries
	Végétaux / Champignons	Etre étanche aux végétaux / champignons
	Précipitations	Etre étanche à la grêle
		Etre étanche à la neige
Absorber	Liquides	Absorber les liquides
	Vapeurs	Absorber les vapeurs
	Gaz	Absorber les gaz
	Radiations	Absorber le rayonnement infrarouge (source de chaleur)
	Températures	Absorber les températures élevées
		Absorber les températures basses
	Bruits	Absorber les bruits aériens intérieurs
		Absorber les bruits aériens extérieurs
		Absorber les bruits d'impact au sol
		Absorber les bruits d'équipement
Résister mécaniquement	Actions mécaniques	Résister aux efforts de compression
		Résister aux efforts de traction (vent, …)
		Résister aux efforts de cisaillement
		Résister aux efforts de flexion
		Résister aux pressions
		Résister aux vibrations (matériels, séisme, …)
		Résister à la fatigue
		Résister aux frottements
		Résister aux chocs durs
		Résister aux chocs mous
		Tourner / Pivoter
		Maintenir en position
		Rigidifier
		Encastrer
		Coller
		Souder
		Visser
		Riveter

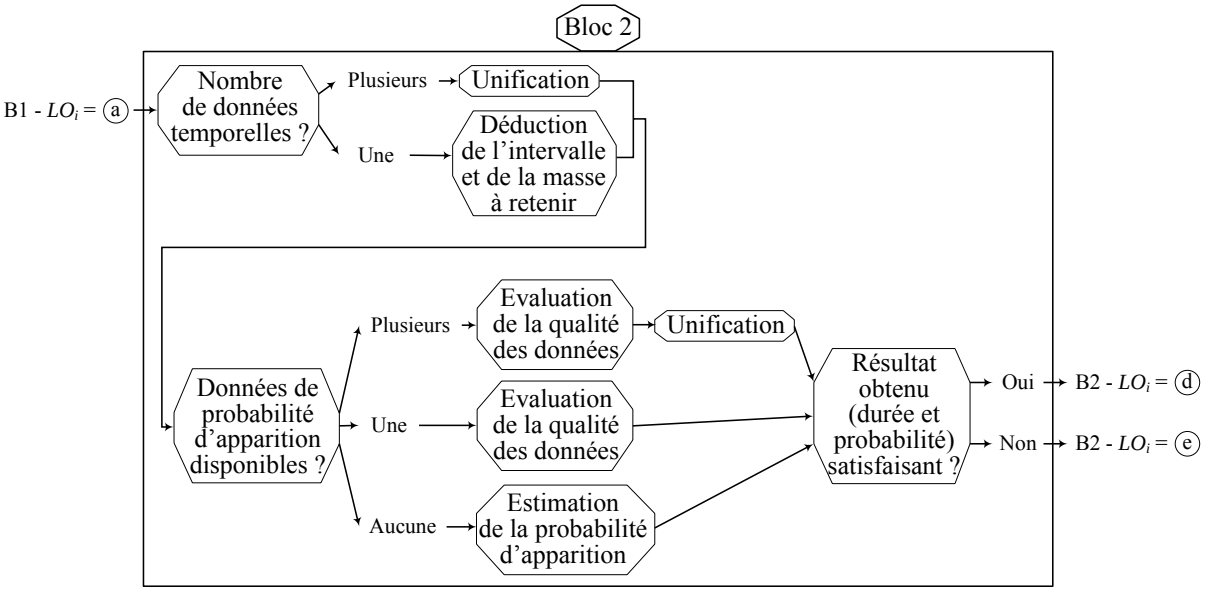
Annexe 9

Arbre de choix de la stratégie de quantification temporelle

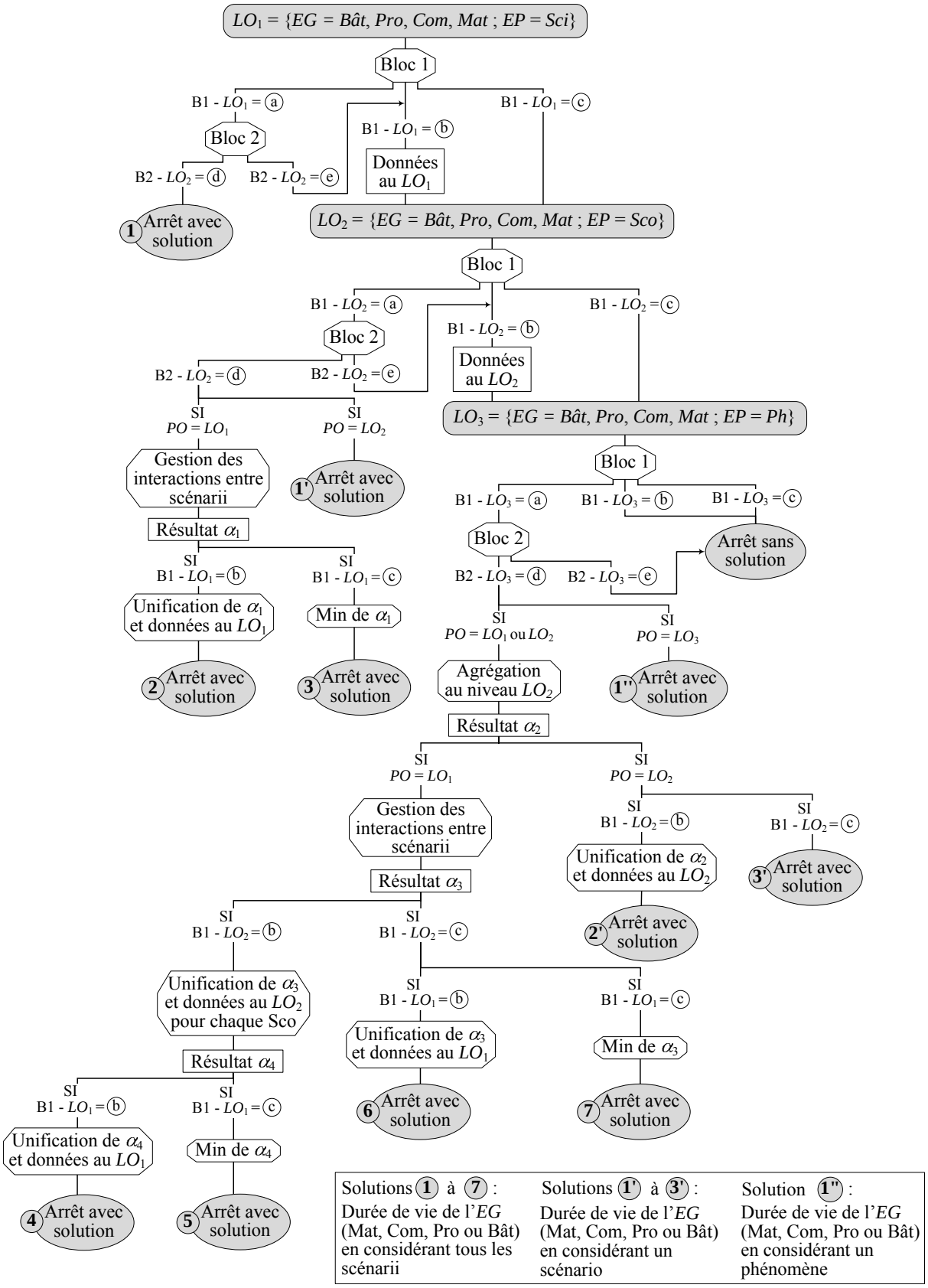
L'arbre de choix de la stratégie de quantification temporelle, utile à l'étape de quantification temporelle de la méthodologie, permet de définir les différentes méthodes à appliquer (unification, agrégation, gestion des interactions, etc.) en fonction du point objectif des données (durées et probabilités d'apparition) aux différents points de l'espace des évaluations.

Cet arbre utilise les deux sous-blocs suivant :





L'arbre de choix, en lui-même, est présenté à la page suivante ; et une illustration de l'utilisation de cet arbre est présentée au I.2 de la partie C.


LO1 = {EG = Bât, Pro, Com, Mat ; EP = Sci}
Bloc 1
B1 - LO1 = a
B1 - LO1 = b
B1 - LO1 = c
Bloc 2
Données au LO1
B2 - LO2 = d
B2 - LO2 = e
1 Arrêt avec solution
LO2 = {EG = Bât, Pro, Com, Mat ; EP = Sco}
Bloc 1
B1 - LO2 = a
B1 - LO2 = b
B1 - LO2 = c
Bloc 2
Données au LO2
B2 - LO2 = d
B2 - LO2 = e
SI PO = LO1
SI PO = LO2
LO3 = {EG = Bât, Pro, Com, Mat ; EP = Ph}
Gestion des interactions entre scénarii
1' Arrêt avec solution
Bloc 1
B1 - LO3 = a
B1 - LO3 = b
B1 - LO3 = c
Résultat α1
Bloc 2
Arrêt sans solution
SI B1 - LO1 = b
SI B1 - LO1 = c
B2 - LO3 = d
B2 - LO3 = e
Unification de α1 et données au LO1
Min de α1
SI PO = LO1 ou LO2
SI PO = LO3
2 Arrêt avec solution
3 Arrêt avec solution
Agrégation au niveau LO2
1'' Arrêt avec solution
Résultat α2
SI PO = LO1
SI PO = LO2
Gestion des interactions entre scénarii
SI B1 - LO2 = b
SI B1 - LO2 = c
Unification de α2 et données au LO2
3' Arrêt avec solution
Résultat α3
2' Arrêt avec solution
SI B1 - LO2 = b
SI B1 - LO2 = c
Unification de α3 et données au LO2 pour chaque Sco
SI B1 - LO1 = b
SI B1 - LO1 = c
Unification de α3 et données au LO1
Min de α3
Résultat α4
6 Arrêt avec solution
7 Arrêt avec solution
SI B1 - LO1 = b
SI B1 - LO1 = c
Unification de α4 et données au LO1
Min de α4
4 Arrêt avec solution
5 Arrêt avec solution
Solutions 1 à 7 : Durée de vie de l'EG (Mat, Com, Pro ou Bât) en considérant tous les scénarii
Solutions 1' à 3' : Durée de vie de l'EG (Mat, Com, Pro ou Bât) en considérant un scénario
Solution 1'' : Durée de vie de l'EG (Mat, Com, Pro ou Bât) en considérant un phénomène

Annexe 10

Sous-graphes fonctionnels de la fenêtre

Il existe sept sous-graphes fonctionnels correspondant aux différents comportements de flux d'agents environnementaux suivants :

① Extérieur : liquides (flux de contact) ; vapeur (flux de contact) ; gaz (flux de contact) ; animaux (flux de contact) ; végétaux (flux de contact) ; précipitations (flux de contact) ; actions mécaniques – frottement (flux de contact) ;

② Extérieur : radiations – U.V. (flux de passage) ;

③ Extérieur : radiations – I.R. (flux de passage) ;

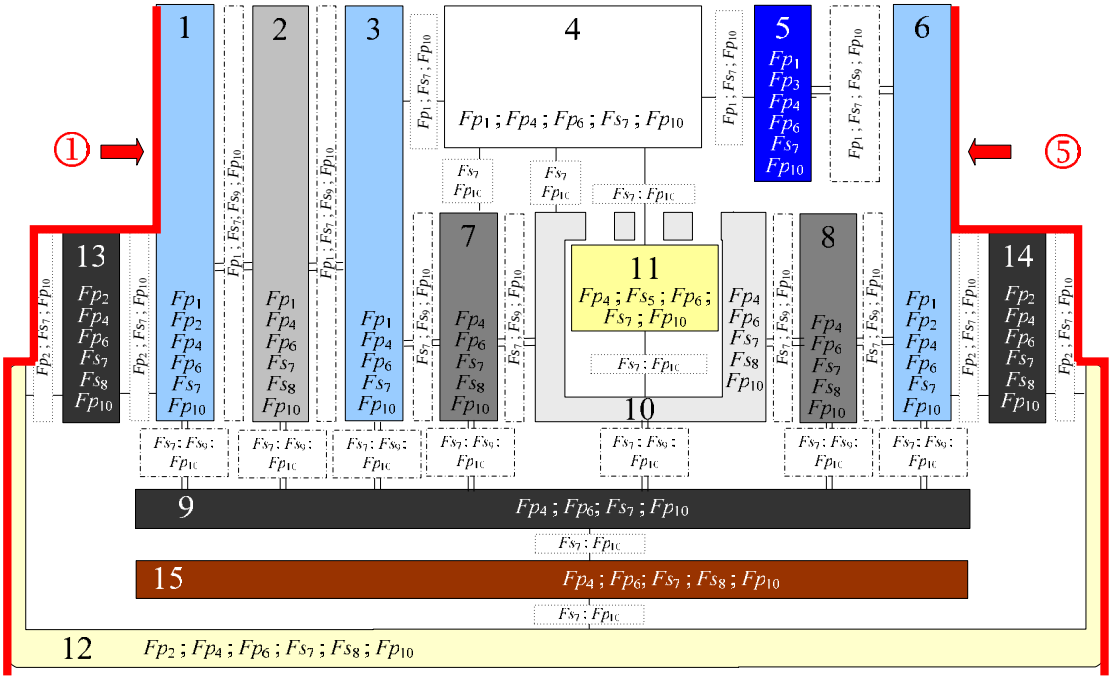
④ Extérieur : températures (flux de passage) ; animaux (flux de force) ; bruits (flux de force) ; actions mécaniques (flux de force) ; précipitations (flux de force) ;

⑤ Intérieur : liquides (flux de contact) ; vapeur (flux de contact) ; gaz (flux de contact) ; bactéries (flux de contact) ; végétaux (flux de contact) ; actions mécaniques – frottement (flux de contact) ;

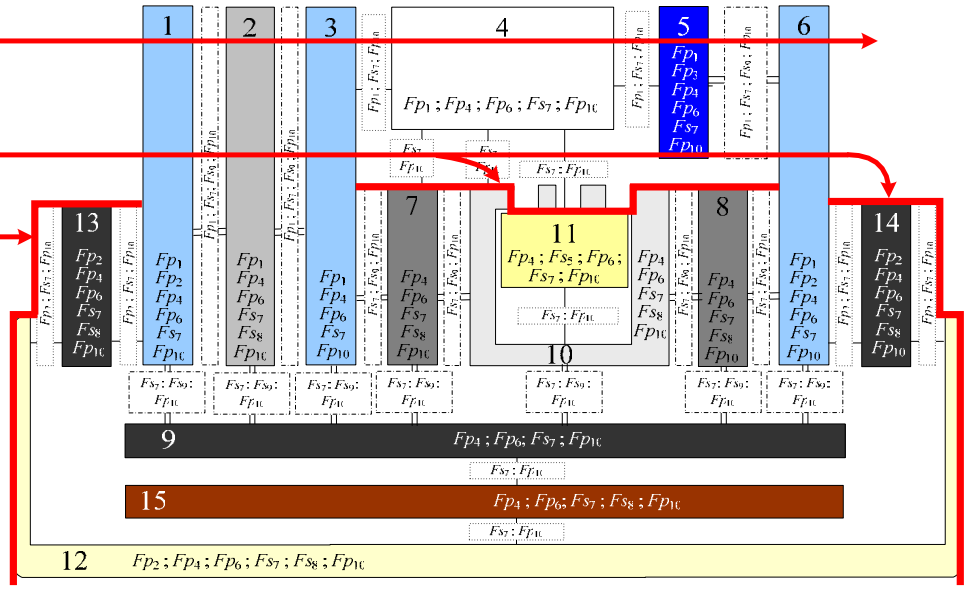
⑥ Intérieur : radiations – lumières artificielles (flux de passage) ;

⑦ Intérieur : radiations – I.R. (flux de passage) ;

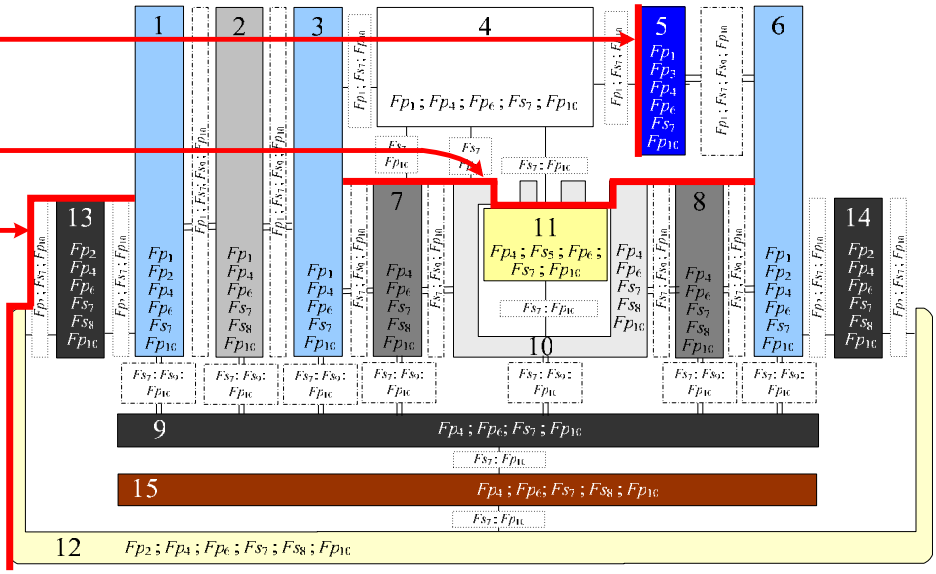
⑧ Intérieur : températures (flux de passage) ; bruits (flux de force) ; actions mécaniques (flux de force).



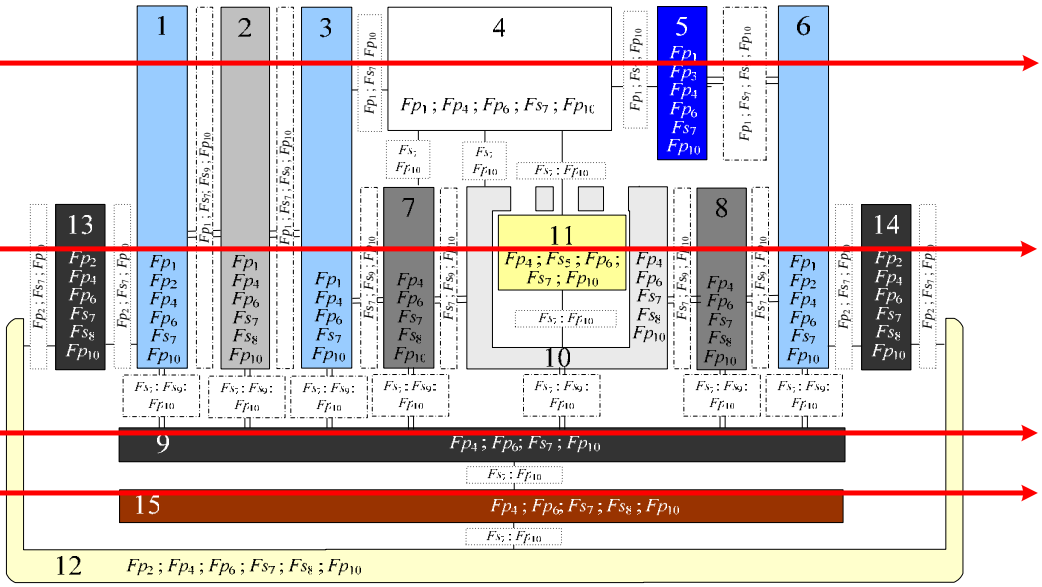
②

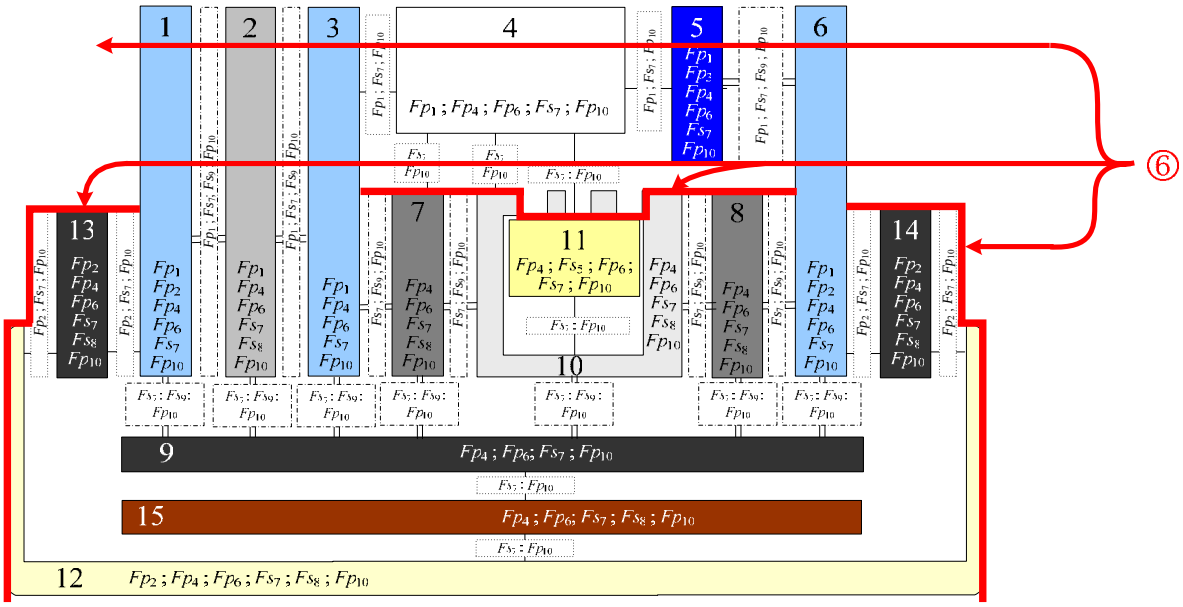

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
Fp1 ; Fp4 ; Fp6 ; Fs7 ; Fp10
Fp4 ; Fs5 ; Fp6 ; Fs7 ; Fp10
Fp4 ; Fp6; Fs7 ; Fp10
Fp4 ; Fp6; Fs7 ; Fs8 ; Fp10
Fp2 ; Fp4 ; Fp6 ; Fs7 ; Fs8 ; Fp10

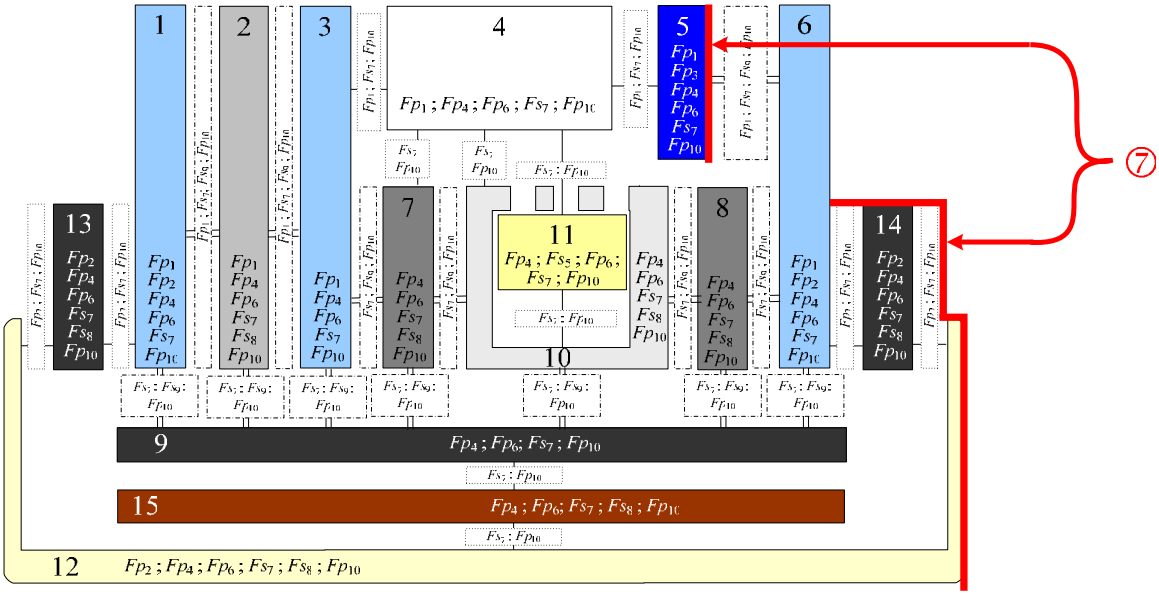
③

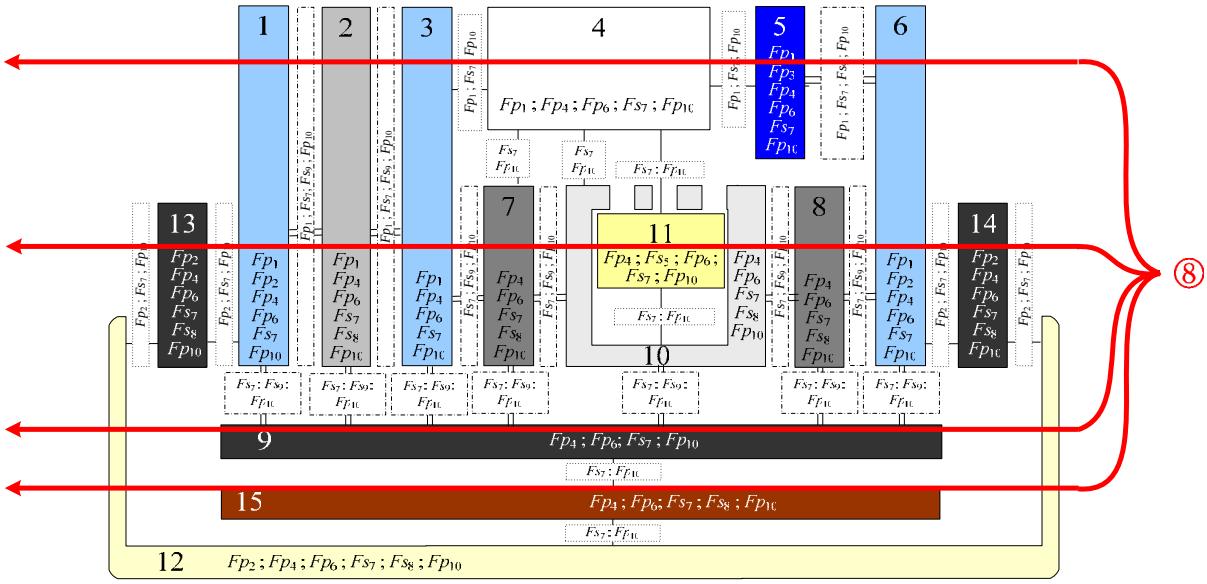

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
Fp1 ; Fp4 ; Fpe ; Fs7 ; Fp10
Fp4 ; Fs5 ; Fpe ; Fs7 ; Fp10
Fp4 ; Fpe; Fs7 ; Fp10
Fp4 ; Fpe; Fs7 ; Fs8 ; Fp10
Fp2 ; Fp4 ; Fpe ; Fs7 ; Fs8 ; Fp10

④


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
Fp1 ; Fp4 ; Fp6 ; Fs7 ; Fp10
Fp4 ; Fs5 ; Fp6 ; Fs7 ; Fp10
Fp4 ; Fp6; Fs7 ; Fp10
Fp4 ; Fp6; Fs7 ; Fs8 ; Fp10
Fp2 ; Fp4 ; Fp6 ; Fs7 ; Fs8 ; Fp10


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
⑥


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
⑦


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
⑧

Annexe 11

Analyse du processus de construction de la fenêtre

Etape	Composants	Phénomène	Cause		Effet
Réalisation du verre feuilleté (lavage, rodage, mise en place des composants, étuvage à 9 bars)	1, 2, 3	Bullage (intercalaire de feuilletage)	méthode	mauvais lavage	Fra. mat. ; PEs
			matériau	qualité	
			env.	chaleur	
		Délamination (verres et intercalaire de feuilletage)	méthode	mauvais lavage ; mauvaise mise en œuvre	PEs ; Décohésion mécanique ; Possibilité de migration de liquide
			matériau	qualité	
		Absence de rodage (verres)	interv.	X	Fra. mat. ; Danger de coupure
Réalisation du verre trempé avec couche basse émissivité (flottage, découpage, trempage, lavage, dépôt couche)	5, 6	Décollement (couche basse émissivité)	méthode	mauvais lavage ; mauvais processus	PEs ; Disparition de la couche basse émissivité
			matériau	qualité	
		Oxydation (couche basse émissivité)	méthode	mauvais processus ; stockage	PEs ; Dégradation des propriétés optiques ; Disparition de la couche basse émissivité
			env.	humidité	
		Inhomogénéité – épaisseur (couche basse émissivité)	méthode	mauvais processus	Fra. mat. ; PEs ; Dégradation des propriétés optiques
			matériau	qualité	
		Tâche de léopard (verre)	méthode	X	PEs
		Torsion / Gauchissement (verre)	méthode	X	Rejet du produit
		Abrasion (couche basse émissivité)	interv.	manipulateurs	PEs ; Dégradation des propriétés optiques ; Disparition de la couche
			moyen	outils de manipulation et de lavage	
			méthode	stockage	
			env.	stockage	
Emargement de la couche basse émissivité par abrasion	5, 6	Absence d'émargement	interv.	manipulateur	Contact entre couche basse émissivité et joint d'adhérence couche
Lavage des verres	1, 2, 3, 5, 6	Abrasion ; Oxydation (couche basse émissivité)	moyen	machine non adaptée	PEs ; Dégradation des propriétés optiques ; Disparition de la couche basse émissivité
			matériau	eau	
		Abrasion (verres)	moyen	machine non adaptée	Fra. mat. ; PEs
		Mauvaise adhérence	moyen	machine non adaptée	Décollement
			méthode	lavage insuffisant	
			matériau	eau	

Collage du joint d'adhérence verre sur le verre feuilleté	1, 2, 3, 7	Matériau insuffisant	interv.	opérateur	Influence sur l'adhérence et l'étanchéité
		Matériau surabondant	interv.	opérateur	PEs
Mise en forme de l'écarteur	10, 11	Perte du disséquant	interv.	opérateur	Détérioration de l'absorption
			méthode	mode opératoire	
		Absence de disséquant	matériau	mauvaise livraison	Détérioration de l'absorption
		Torsion / Gauchissement	interv.	opérateur	Rejet avant mise en œuvre
			méthode	mauvaise méthode de stockage	
Collage de l'écarteur sur le verre feuilleté, puis le joint d'adhérence couche	1, 2, 3, 7, 10, 11	Matériau insuffisant	interv.	opérateur	Influence sur l'adhérence et l'étanchéité
		Matériau surabondant	interv.	opérateur	PEs
Collage du verre trempé sur le verre feuilleté + joint d'adhérence verre + écarteur + joint d'adhérence couche sous enceinte	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11	Mauvaise composition du gaz	interv.	opérateur	Sollicitation des composants connexes
			méthode	mauvais processus	
		Humidité	interv.	opérateur	Sollicitation des propriétés d'absorption de l'absorbeur d'humidité
			méthode	mauvais processus	
		Décalage	interv.	opérateur	Rejet du produit
			moyen	dérèglement de la machine	
			env.	"alcool"	
Collage du joint d'étanchéité {verre feuilleté, joints d'adhérence, écarteur, verre trempé}	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	Matériau insuffisant ; Inhomogénéité ; Discontinuité	interv.	opérateur	Influence sur l'adhérence et l'étanchéité
Stockage (en température ambiante pour le séchage du joint d'étanchéité), transport, manutention du double vitrage	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	Echauffement (verres)	env.	chaleur	Fra. mat.
		Abrasion (verres)	interv.	X	Fra. mat. ; PEs
			méthode	X	
			env.	X	
		Irisation (verres)	env.	eau + acide sans ventilation	Fra. mat. ; PEs
		Torsion / Gauchissement (verres)	interv.	opérateur	Rejet du produit
			méthode	mauvaise méthode de stockage	
		Fluage (verres)	interv.	opérateur	Fra. mat. ; Difficulté de mise en œuvre ; PEs
			méthode	mauvaise méthode de stockage	
			env.	chaleur	
		Epaufrure (verres)	env.	chocs	Fra. mat. ; PEs
		Casse thermique (verres)	env.	chaleur	Rejet du produit

Stockage (en température ambiante pour le séchage du joint d'étanchéité), transport, manutention du double vitrage	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	Echauffement (intercalaire de feuilletage)	env.	chaleur T°C > 60°C	Fra. mat. ; Dégradation de la visibilité
		Echauffement (joints d'adhérence)	env.	chaleur	Fra. mat.
		Echauffement (joint étanchéité)	env.	chaleur > 100°C	Fra. mat.
		Dilatation (écarteur)	env.	chaleur	Fra. mat.
		Vrillement (écarteur)	interv.	opérateur	Fra. mat. ; Difficulté de mise en œuvre ; PEs
			méthode	mauvaise méthode de stockage	
			env.	chaleur	
		Perforation localisée du joint étanchéité et de l'écarteur	interv.	opérateur, tiers	Fra. mat. ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux
			méthode	mauvaise méthode de stockage	
			env.	pointe	
Assemblage du double vitrage et de la menuiserie (mise en place de la cale de centrage et des joints de calfeutrement)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	Cale inappropriée	interv.	opérateur	Mise en compression du vitrage
		Vrillement (joints de calfeutrement)	interv.	opérateur	Fra. mat. ; Sollicitation mécanique du vitrage
			matériau	qualité	
Stockage, transport, manutention de la fenêtre	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	Echauffement ; Abrasion ; Irisation ; Torsion / Gauchissement ; Fluage ; Epaufrure (verres)	idem stockage, transport, manutention du vitrage		
		Echauffement (intercalaire de feuilletage)	idem stockage, transport, manutention du vitrage		
		Echauffement (joints d'adhérence)	idem stockage, transport, manutention du vitrage		
		Echauffement (joint étanchéité)	idem stockage, transport, manutention du vitrage		
		Perforation localisée du joint étanchéité et de l'écarteur	idem stockage, transport, manutention du vitrage		
		Dilatation (écarteur)	idem stockage, transport, manutention du vitrage		
		Vrillement (écarteur)	idem stockage, transport, manutention du vitrage		
		Vrillement (menuiserie)	interv.	opérateur	Fra. mat. ; PEs ; Difficulté de mise en œuvre
			méthode	mauvaise méthode de stockage	
			env.	chaleur > 90°C	
		Echauffement (joints de calfeutrement)	méthode	méthodes de stockage	Fra. mat.
			env.	chaleur	

Signification des abréviations utilisées :

- Env. : Environnement
- Fra. mat. : Fragilisation du matériau
- Interv. : Intervenant
- PEs : Perte d'esthétisme

Annexe 12

Extrait de l'AMDE de la fenêtre

Les abréviations utilisées dans le tableau AMDE ci-après sont les suivantes :

- **DiVi / DeVi** : Diminution / Défaillance de la visibilité
- **DeEt** : Défaillance de l'étanchéité
- **DiSRI / DeSRI** : Diminution / Défaillance de stopper le rayonnement infrarouge
- **DiATB / DeATB** : Diminution / Défaillance de l'atténuation des températures et des bruits
- **DiAb / DeAb** : Diminution / Défaillance de l'absorption d'humidité
- **DiRM / DeRM** : Diminution / Défaillance de la résistance mécanique
- **DiIn / DeIn** : Diminution / Défaillance de l'intégrité
- **DiMP / DeMP** : Diminution / Défaillance du maintien en position
- **DeAd** : Défaillance de l'adhésion
- **PEs** : Perte d'esthétique
- **NC** : Non conformité
- **Causes A / et.1 à 9** : ([([([(Causes A.1 ; Causes A.2) + Causes c-2] ; Causes A.3 ; Causes A.4) + Causes c-3.1 et év. c-3.2 ; Causes A.5] + Causes i-3/7 ; Causes A.6) + Causes c-7 ; Causes A.8] + Causes i-7/10) ; Causes A.7 ; [([(Causes A.9 ; Causes A.10) + Causes i-6/8 ; Causes A.11] + Causes c-8 ; Causes A.12) + Causes i-8/10]
- **Causes A.1 / et.1 à 9** : (Causes c-1.1 et év. c-1.2) ; (Causes c-1.1 et év. c-1.2)+ [Causes i-1/9 ; (Causes c-9 + Causes i-1/9) ; (Causes i-9/15 + Causes c-9 + Causes i-1/9)]
- **Causes A.2 / et.0 à 8** : [(Causes i-9/15 + Causes c-9) ; Causes c-9 ; Causes i-1/9] + Causes i-1/2
- **Causes A.3 / et.0 à 8** : [(Causes i-9/15 + Causes c-9) ; Causes c-9 ; (Causes i-1/9 + Causes i-2/9)] + Causes i-2/3
- **Causes A.4 / et.0 à 8** : (Causes i-1/9 + Causes i-2/9 + Causes i-3/9) ; (Causes c-9 + Causes i-3/9) ; (Causes i-9/15 + Causes c-9 + Causes i-3/9)
- **Causes A.5 / et.0 à 8** : (Causes i-1/9 + Causes i-2/9 + Causes i-3/9) ; Causes c-9 ; (Causes i-9/15 + Causes c-9)
- **Causes A.6 / et.1 à 8** : (Causes i-1/9 + Causes i-2/9 + Causes i-3/9 + Causes i-7/9) ; (Causes c-9 + Causes i-7/9) ; (Causes i-9/15 + Causes c-9 + Causes i-7/9)
- **Causes A. 7 / et.1 à 8** : (Causes i-1/9 + Causes i-2/9 + Causes i-3/9 + Causes i-7/9 + causes i-9/10) ; (Causes c-9 + Causes i-9/10) ; (Causes i-9/15 + Causes c-9 + Causes i-9/10)
- **Causes A.8 / et.0 à 8** : Causes c-9 ; (Causes i-9/15 + Causes c-9) ; (Causes i-1/9 + Causes i-2/9 + Causes i-3/9 + Causes i-7/9)
- **Causes A.9 / et.1 à 9** : (Causes c-6.1 et év. c-6.2) ; (Causes c-6.1 et év. c-6.2) + [Causes i-6/9 ; Causes c-9 ; (Causes i-9/15 + Causes c-9)]
- **Causes A.10 / et.0 à 8** : (Causes i-9/15 + Causes c-9) ; Causes c-9 ; Causes i-6/9
- **Causes A.11 / et.1 à 8** : (Causes i-6/9 + Causes i-8/9) ; (Causes c-9 + Causes i-8/9) ; (Causes i-9/15 + Causes c-9 + Causes i-8/9)
- **Causes A.12 / et.0 à 8** : (Causes i-6/9 + Causes i-8/9) ; Causes c-9 ; (Causes i-9/15 + Causes c-9)
- **Causes B / et.1 à 12** : [(Causes A.1 ; Causes A.2) + Causes c-2 ; Causes A.3 ; Causes A.4] + Causes c-3.1 et év. c-3.2 **;** [([(Causes A.1 ; Causes A.2) + Causes c-2 ; Causes A.3 ; Causes A.4] + Causes c-3.1 et év. c-3.2) ; Causes A.5] + Causes i-3/7 **;** [([([(Causes A.1 ; Causes A.2) + Causes c-2 ; Causes A.3 ; Causes A.4] + Causes c-3.1 et év. c-3.2) ; Causes A.5] + Causes i-3/7) ; Causes A.6] + Causes c-7 **;** [([([([(Causes A.1 ; Causes A.2) + Causes c-2 ; Causes A.3 ; Causes A.4] + Causes c-3.1 et év. c-3.2) ; Causes A.5] + Causes i-3/7) ; Causes A.6] + Causes c-7) ; Causes A.8] + Causes i-7/10 **;** Causes A + Causes c-10 + Causes c-11 **;** (Causes A.6 ; Causes A.8 + Causes i-7/10) + Causes c-7 + Causes i-3/7 **;** [(Causes A.6 ; Causes A.8 + Causes i-7/10) + Causes c-7 + Causes i-3/7] + Causes c-3.1 et év. c-3.2 **;** (Causes A.11 ; Causes A.12) + Causes c-8 + Causes i-6/8 **;** (Causes A.11 ; Causes A.12) + Causes c-8 + Causes i-6/8 + Causes c-6.1 et év. c-6.2 **;** (Causes A.9 ; Causes A.10) + Causes i-6/8 **;** ([(Causes A.9 ; Causes A.10) + Causes i-6/8] ; Causes A.11) + Causes c-8 ; ([([(Causes A.9 ; Causes A.10) + Causes i-6/8] ; Causes A.11) + Causes c-8] ; Causes A.12) + Causes i-8/10
- **Causes C / et.1 à 9** : (Causes c-1.1 ; Causes i-1/9 ; (Causes c-9 + Causes i-1/9) ; (Causes i-9/15 + Causes c-9 + Causes i-1/9) ; [(Causes A.6 ; [Causes A.8 + Causes i-7/10]) + Causes c-7 + Causes i-3/7 + Causes c-3.1 et év. c-3.2 + Causes i-2/3 + Causes c-2 + Causes i-1/2]) + Causes c-1.2
- **Causes D / et.0 à 9** : (Causes i-1/9 ; Causes c-9 ; (Causes i-9/15 + Causes c-9) ; [(Causes A.6 ; [Causes A.8 + Causes i-7/10]) + Causes c-7 + Causes i-3/7 + Causes c-3.1 et év. c3.2 + Causes i-2/3 + Causes c-2]) + Causes i-1/2
- **Causes E / et.0 à 9** : ([(Causes A.1 ; Causes A.2) + Causes c-2] ; [Causes i-9/15 + Causes c-9] ; Causes c-9 ; [Causes i-1/9 + Causes i-2/9] ; [(Causes A.6 ; [Causes A.8 + Causes i-7/10]) + Causes c-7 + Causes i-3/7 + Causes c-3.1 et év. c-3.2]) + Causes i-2/3

- **Causes F / et.0 à 9** : ([([Causes A.1 ; Causes A.2] + Causes c-2) ; Causes A.3 ; Causes A.4] ; [(Causes A.6 ; [Causes A.8 + Causes i-7/10]) + Causes c-7 + Causes i-3/7]) + Causes c-3.2
- **Causes G / et.1 à 9** : (Causes c-6.1 ; Causes i-6/9 ; Causes c-9 ; [(Causes A.11 ; Causes A.12) + Causes c-8 + Causes i-6/8]) + Causes c-6.2
- **Causes c-1.1 ...et.1 à 9** : Fissuration (a) verre ext. ...et.1 ; Fissuration (b) verre ext. ...et.2 à 5 ; Fissuration (c) verre ext. ...et.2 à 7 ; Fissuration (d) verre ext. ...et.2 à 7 ; Fissuration (e) verre ext. ...et.4 à 9
- **Causes c-1.2 ...et.0 à 1** : Délamination verre ext. ...et.0 ; Dévitrification verre ext. ...et.1
- **Causes c-2 ...et.0 à 1** : Bullage int. de fe. ...et.0 ; Décomposition int. de fe. ...et.1
- **Causes c-3.1 ...et.1 à 9** : Fissuration (a) verre int. ...et.1 ; Fissuration (b) verre int. ...et.2 à 5 ; Fissuration (c) verre int. ...et.2 à 7 ; Fissuration (d) verre int. ...et.2 à 7 ; Fissuration (e) verre int. ...et.4 à 9
- **Causes c-3.2 ...et.0 à 1** : Délamination verre int. ...et.0 ; Dévitrification verre int. ...et.1
- **Causes c-6.1 ...et.1 à 9** : Fissuration (a) verre tr. ...et.1 ; Fissuration (b) verre tr. ...et.2 à 5 ; Fissuration (c) verre tr. ...et.3 à 9
- **Causes c-6.2 ...et.1** : Dévitrification verre tr. ...et.1
- **Causes c-7 ...et.0 à 8** : Fissuration joint adh. verre ...et.2 à 7 ; Rupture joint adh. verre ...et.3 à 8 ; Matériau (joint adh. verre) insuffisant ...et.0
- **Causes c-8 ...et.0 à 8** : Fissuration joint adh. couche ...et.2 à 7 ; Rupture joint adh. couche ...et.3 à 8 ; Matériau (joint adh. couche) insuffisant ...et.0
- **Causes c-9 ...et.0 à 8** : Fissuration joint ét. ...et.2 à 7 ; Rupture joint ét. ...et.3 à 8 ; Matériau (joint ét.) insuffisant ...et.0 ; Inhomogénéité joint ét. ...et.0 ; Discontinuité joint ét. ...et.0
- **Causes c-10 ...et.1 à 11** : Fissuration écateur ...et.1 ; Perforation (a) écarteur ...et.1 à 11
- **Causes c-11 ...et.1 à 12** : Humidité gaz sec ...et.0 ; Fissuration écarteur ...et.1 ; Perforation (a) écarteur ...et.1 à 11
- **Causes c-12 ...et.1 à 2** : Fissuration (a) men. ...et.1 ; Fissuration (b) men. ...et.1-2
- **Causes c-13 ...et.2 à 5** : Fissuration joint calf. ext. ...et.2 à 5
- **Causes c-14 ...et.2 à 5** : Fissuration joint calf. int. ...et.2 à 5
- **Causes i-1/2 ...et.0 à 2** : Décollement verre ext. / int. de fe. ...et.1-2 ; Délamination verre ext. / int. de fe. ...et.0
- **Causes i-1/9 ...et.1 à 2** : Décollement verre ext. / joint ét. ...et.1-2
- **Causes i-2/9 ...et.1 à 2** : Décollement int. de fe. / joint ét. ...et.1-2 ; Effet de pelage int. de fe. / joint ét. ...et.1 ; Réaction chimique int. de fe. / joint ét. ...et.1
- **Causes i-1/13 ...et.1 à 3** : Espacement verre ext. / joint calf. ext. ...et.1 à 3
- **Causes i-2/3 ...et.0 à 2** : Décollement int. de fe. / verre int. ...et.1-2 ; Délamination int. de fe. / verre int. ...et.0
- **Causes i-3/7 ...et.1 à 7** : Décollement verre int. / joint adh. verre ...et. 1 à 7
- **Causes i-3/9 ...et.1 à 2** : Décollement verre int. / joint ét. ...et.1-2
- **Causes i-6/8 ...et.1 à 7** : Décollement verre tr. / joint adh. couche ...et. 1 à 7
- **Causes i-6/9 ...et.1 à 2** : Décollement verre tr. / joint ét. ...et.1-2
- **Causes i-6/14 ...et.1 à 3** : Espacement verre tr. / joint calf. int. ...et.1 à 3
- **Causes i-7/9 ...et.1 à 7** : Décollement joint adh. verre / joint ét. ...et.1 à 7 ; Effet de pelage joint adh. verre / joint ét. ...et.1 ; réaction chimique joint adh. verre / joint ét. ...et.1
- **Causes i-7/10 ...et.1 à 7** : Décollement joint adh. verre / écarteur ...et.1 à 7 ; Vieillissement prématuré joint adh. verre / écarteur ...et.1
- **Causes i-8/9 ...et.1 à 7** : Décollement joint adh. couche / joint ét. ...et.1 à 7 ; Effet de pelage joint adh. couche / joint ét. ...et.1 ; Réaction chimique joint adh. couche / joint ét. ...et.1
- **Causes i-8/10 ...et.1 à 7** : Vieillissement prématuré joint adh. couche / écarteur ...et.1 ; Décollement joint adh. couche / écarteur ...et.1 à 7
- **Causes i-9/10 ...et.1 à 4** : Décollement joint ét. / écarteur ...et.1 à 4 ; Vieillissement prématuré joint ét. / écarteur ...et.1
- **Causes i-12/13 ...et.1 à 3** : Espacement men. / joint calf. ext. ...et.1 à 3
- **Causes i-12/14 ...et.1 à 3** : Espacement men. / joint calf. int. ...et.1 à 3

Fonction	Elément	Etape	Mode	Cause	Effet direct	Effet indirect
Etre transparent	Verre extérieur (verre ext.)	0	Délamination	Réalisation du verre feuilleté (mauvais lavage, mauvaise mise en œuvre, qualité du matériau)	DiVi	Décohésion mécanique ; DiIn ; PEs ; Perte de sécurité
		0	Abrasion	Lavage (machine non adaptée) ; Stockage, transport, manutention du vitrage	DiVi	Fragilisation du matériau (DiIn et DiRM) ; PEs
		1	Abrasion	Entretien avec produit non adapté (abrasif)	DiVi	Fragilisation du matériau (DiIn et DiRM) ; PEs
		0	Irisation	Stockage, transport, manutention du vitrage (eau + acide sans ventilation)	DiVi	Fragilisation du matériau (DiIn et DiRM) ; PEs
		1	Attaque chimique	Acides; alcalis	DiVi	PEs
		1	Dépôt blanchâtre de calcite	Ruissellement de pluies froides fortement chargées en chaux	DiVi	PEs
		1	Dépôt	Micro-organismes	DiVi	PEs
		1	Trace	Animaux (escargots)	DiVi	PEs
		1	Fissuration (a)	Δt int.-ext. (T°C basse, précipitations) ; Δt zone d'ombre ; choc thermique; choc mécanique	DiVi	DeEt ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux extérieur
		1	Dévitrification	T°C > 600°C	DiVi	DiIn ; DiRM ; PEs
		1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeVi	DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux extérieur ; Report sollicitations mécaniques sur verre int. et trempé
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeVi	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeVi	
		2 à 6	Rupture (a)	Fissuration (a-b) verre ext...et.1 à 5	DeVi	
		1	Déformation (a)	T°C élevée ; Radiations I.R. ; Poids des charges ; Vent ; Pression ; Force appliquée sur le vitrage	DiVi	DiRM ; DiIn ; PEs
		1 à 4	Déformation (b)	(Déformation joint de calf. ext. et/ou int. ...et.1-2) + éventuellement (Durcissement joint de calf. ext. et/ou int. …et.1) ; Vrillement joint de calf. ext. et/ou int. …et.0 ; Ecrasement (a) écarteur…et.2-3 ; (Dilatation / Contraction écarteur...et.0) + (Durcissement joint adh. couche et/ou verre...et.1) + éventuellement [(Déformation joint calf. ext. et/ou int. ...et.1-2) ou (Vrillement joint calf. ext. et/ou int. ...et.0)]	DiVi	DiRM ; DiIn ; PEs
		2 à 5	Fissuration (b)	Déformation (a-b) verre ext. …et.1 à 4 + éventuellement [(Délamination verre ext. … et.0) ; (Abrasion verre ext. …et.0-1) ; (Irisation verre ext. …et.0) ; (Dévitrification verre ext. …et.1) ; (Fluage verre ext. ...et.0-1) ; (Echauffement verre ext. ...et.0) ; (Epaufrure verre ext. ...et.0) ; (Absence de rodage verre ext. ...et.0)]	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		2 à 7	Fissuration (c)	{Rupture (a) verre int. …et.2 à 6 + [(Bullage Int. Feuil. ...et.0) et/ou (Echauffement Int. Feuil. …et.0) et/ou (Décomposition Int. Feuil. …et.1) et/ou (Délamination verre ext. / Int. Feuil….et.0 et/ ou Délamination Int. Feuil. / verre int. …et.0) et/ou (Décollement verre ext. / Int. Feuil….et.1 et/ ou Décollement Int. Feuil. / verre int. …et.1)] + éventuellement [Δt int.-ext. ; Δt zone d'ombre choc thermique ; choc mécanique]} ; Casse thermique verre int...et.1 ; Casse verre int. ...et.1 ; Rupture spontanée verre int. ...et.1	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux (c. 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11)
		3 à 8	Rupture (b)	Fissuration (c) verre ext.....et.2 à 7	DeVi	DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux (c. 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11) ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre tr.
		2 à 7	Fissuration (d)	(Rupture (a) verre tr.…et.2 à 6) ou (Casse thermique du verre tr.…et.1) ou (Casse du verre tr.…et.1) ou (Rupture spontanée du verre tr.…et.1)	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux

Etre transparent	Verre extérieur (verre ext.)	3 à 6	Rupture (c)	Fissuration (d) du verre ext. …et.2 à 7	DeVi	DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre int.
		4 à 9	Fissuration (e)	(Rupture (c) du verre int. …et.3 à 8) + [(Bullage Int. Feuil. ...et.0) et/ou (Echauffement Int. Feuil. …et.0) et/ou (Décomposition Int. Feuil. …et.1) et/ou (Délamination verre ext. / Int. Feuil….et.0 et/ ou Délamination Int. Feuil. / verre int. …et.0) et/ou (Décollement verre ext. / Int. Feuil….et.1 et/ ou Décollement Int. Feuil. / verre int. …et.1)] + éventuellement [Δt int.-ext. ; Δt zone d'ombre choc thermique ; choc mécanique]	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur
		5 à 10	Rupture (d)	Fissuration (e) du verre ext. ...et.4 à 9	DeVi	DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur ; Défaillance vitrage
		2 à 10	Migration de liquides	Causes C (et.1 à 9)	DiVi	PEs
	Intercalaire de feuilletage (int. de fe.)	0	Bullage	Réalisation du verre feuilleté (mauvais lavage, qualité du matériau, T°C élevée)	DiVi	DiRM ;DiMP ; PEs ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux
		1	Décomposition	T°C > 80°C	DeVi	DeRM ; DeIn ; DeMP ; DeATB ; PEs ; Décohésion du verre feuilleté ; Influence sur l'adhérence des interfaces ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux
	Verre intérieur (verre int.)	0	Délamination	Réalisation du verre feuilleté (mauvais lavage, mauvaise mise en œuvre, qualité du matériau)	DiVi	Décohésion mécanique ; DiIn ; PEs ; Perte de sécurité
		0	Abrasion	Lavage (machine non adaptée)	DiVi	Fragilisation du matériau (DiIn et DiRM) ; PEs
		1	Fissuration (a)	Δt int.-ext. (T°C basse, précipitations) ; Δt zone d'ombre ; choc thermique; choc mécanique	DiVi	DiRM ; DiIn ; PEs ; Possibilité de passage d'agents environnementaux
		1	Dévitrification	T°C > 600°C	DiVi	DiIn ; DiRM ; PEs
		1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeVi	DeIn ; DeRM ; PEs ; DeATB ; Possibilité de passage d'agents environnementaux ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre ext. et trempé
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeVi	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeVi	
		2 à 6	Rupture (a)	Fissuration (a-b) verre int....et.1 à 5	DeVi	
		1	Déformation (a)	T°C élevée ; Radiations I.R. ; Poids des charges ; Vent ; Pression ; Force appliquée sur le vitrage	DiVi	DiRM ; DiIn ; PEs
		1 à 4	Déformation (b)	idem déformation verre ext.…et. 1 à 4	DiVi	DiRM ; DiIn ; PEs
		2 à 5	Fissuration (b)	Déformation (a-b) verre int. …et.1 à 4 + éventuellement [(Délamination verre int. … et.0) ; (Abrasion verre int. …et.0) ; (Dévitrification verre int. …et.1) ; (Fluage verre int. ...et.0-1) ; (Echauffement verre int. ...et.0) ; (Absence de rodage verre ext. ...et.0)]	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Possibilité de passage d'agents environnementaux
		2 à 7	Fissuration (c)	{Rupture (a) verre ext. …et.2 à 6 + [(Bullage Int. Feuil. ...et.0) et/ou (Echauffement Int. Feuil. …et.0) et/ou (Décomposition Int. Feuil. …et.1) et/ou (Délamination verre ext. / Int. Feuil….et.0 et/ ou Délamination Int. Feuil. / verre int. …et.0) et/ou (Décollement verre ext. / Int. Feuil….et.1 et/ ou Décollement Int. Feuil. / verre int. …et.1)] + éventuellement [Δt int.-ext. ; Δt zone d'ombre choc thermique ; choc mécanique]} ; Casse thermique verre ext...et.1 ; Casse verre ext. ...et.1 ; Rupture spontanée verre ext. ...et.1	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux

Etre transparent	Verre intérieur (verre int.)	3 à 8	Rupture (b)	Fissuration (c) verre int....et.2 à 7	DeVi	DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux; Report des sollicitations mécaniques sur le verre tr.
		2 à 7	Fissuration (d)	idem Fissuration (d) verre ext. (être trans.) ...et. 2 à 7	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux
		3 à 8	Rupture (c)	Fissuration (d) verre int. ...et.2 à 7	DeVi	DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux; Report des sollicitations mécaniques sur le verre ext.
		4 à 9	Fissuration (e)	(Rupture (c) du verre ext. …et.3 à 8) + [(Bullage Int. Feuil. ...et.0) et/ou (Echauffement Int. Feuil. …et.0) et/ou (Décomposition Int. Feuil. …et.1) et/ou (Délamination verre ext. / Int. Feuil….et.0 et/ ou Délamination Int. Feuil. / verre int. …et.0) et/ou (Décollement verre ext. / Int. Feuil….et.1 et/ ou Décollement Int. Feuil. / verre int. …et.1)] + éventuellement [Δt int.-ext. ; Δt zone d'ombre choc thermique ; choc mécanique]	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur
		5 à 10	Rupture (d)	Fissuration (e) du verre int. ...et.4 à 9	DeVi	DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur ; Défaillance vitrage
		1 à 10	Migration de liquides	Causes F (et.1 à 9)	DiVi	PEs
	Gaz sec	2 à 14	Humidité	Saturation abs. hum. ...et.1 à 13	DiVi	Sollicitation des composants connexes (3, 5, 6, 7, 8, 10, 11)
	Couche basse émissivité (cou. b. émi.)	0	Décollement	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (mauvais lavage et processus, qualité du matériau)	DiVi	DiRM ; DiIn ; DiSRI ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		0	Oxydation (a)	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (mauvais processus, stockage, humidité) ; Lavage (non adaptée, eau)	DiVi	DiRM ; DiIn ; DiSRI ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		1 à 13	Oxydation (b)	Composés nocifs (acide) dus à [Causes B (et.1 à 12) ; Mauvaise composition du gaz sec ...et.0]	DiVi	DiRM ; DiIn ; DiSRI ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11) ; idem oxydation (a) cou. b. émi.
		0	Inhomogénéité	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (mauvais processus, qualité du matériau)	DiVi	DiIn ; DiSRI ; PEs
		0	Abrasion	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (manipulateurs, outils de manutention et de lavage, conditions de stockage) ; Lavage (machine non adaptée, eau)	DiVi	DiRM ; DiIn ; DiSRI ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		2 à 10	Fissuration	Fissuration (a-b-c) du verre tr. ...et.1 à 9	DiVi	DiSRI
		3 à 11	Rupture	Rupture (a-b) du verre tr. ...et.2 à 10	DeVi	DeSRI
		2 à 5	Décollement	Déformation (a-b) verre tr. …et.1 à 4	DiVi	DiRM ; DiIn ; DiSRI ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		3 à 15	Ternissure	(Humidité gaz sec ...et.2 à 14) + Composés soufrés dus à [Causes B (et.1 à 12) ; Mauvaise composition du gaz sec ...et.0]	DiVi	DiIn ; DiSRI ; PEs
	Verre trempé (verre tr.)	0	Abrasion	Lavage (machine non adaptée) ; Stockage, transport, manutention du vitrage	DiVi	Fragilisation du matériau (DiIn et DiRM) ; PEs
		1	Abrasion	Entretien avec produit non adapté (abrasif)	DiVi	Fragilisation du matériau (DiIn et DiRM) ; PEs
		0	Tâche de léopard	Fabrication par trempe thermique	DiVi	PEs
		1	Dépôt	Micro-organismes	DiVi	PEs
		1	Trace	Animaux (escargots)	DiVi	PEs
		1	Fissuration (a)	Δt int.-ext. (T°C basse, précipitations) ; Δt zone d'ombre ; choc thermique; choc mécanique	DiVi	DiRM ; DiIn ; PEs ; DeEt ; Infiltration d'agents environnementaux intérieur

Etre transparent	Verre trempé (verre tr.)	1	Dévitrification	T°C > 600°C	DiVi	DiIn ; DiRM ; PEs
		1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeVi	DeEt ; DeIn ; DeRM ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux intérieur ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre feuilleté
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeVi	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeVi	
		2 à 6	Rupture (a)	Fissuration (a-b) verre tr....et.1 à 5	DeVi	
		1	Déformation (a)	T°C élevée ; Radiations I.R. ; Poids des charges ; Vent ; Pression ; Force appliquée sur le vitrage	DiVi	DiRM ; DiIn ; PEs
		1 à 4	Déformation (b)	idem déformation (b) verre ext.…et. 1 à 4	DiVi	DiRM ; DiIn ; PEs
		2 à 5	Fissuration (b)	Déformation (a-b) verre tr. …et.1 à 4 + éventuellement [(Abrasion verre tr. …et.0-1) ; (Dévitrification verre tr. …et.1) ; (Fluage verre tr. ...et.0-1) ; (Echauffement verre tr. ...et.0) ; (Epaufrure verre tr. ...et.0)]	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		3 à 9	Fissuration (c)	(Rupture (b) du verre int. …et.3 à 8) ou (Rupture (b) du verre ext. …et.3 à 8) ou {(Rupture (a) verre int. …et.2 à 6) + (Rupture (a) verre ext. ...et.2 à 6) + [(Bullage Int. Feuil. ...et.0) et/ou (Echauffement Int. Feuil. …et.0) et/ou (Décomposition Int. Feuil. …et.1) et/ou (Délamination verre ext. / Int. Feuil….et.0 et/ ou Délamination Int. Feuil. / verre int. …et.0) et/ou (Décollement verre ext. / Int. Feuil….et.1 et/ ou Décollement Int. Feuil. / verre int. …et.1)] + éventuellement [Δt int.-ext. ; Δt zone d'ombre choc thermique ; choc mécanique]}	DiVi	DiIn ; DiRM ; DeEt ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		4 à 10	Rupture (b)	Fissuration (c) verre tr....et.3 à 9	DeVi	DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux ; Défaillance vitrage
		2 à 10	Migration de liquides	Causes G (et.1 à 9)	DiVi	PEs
	Verre extérieur / intercalaire de feuilletage	0	Délamination	Réalisation du verre feuilleté (mauvais lavage, mauvaise mise en œuvre, qualité de l'intercalaire)	DiVi	DiAd ; NC
		1 ; 2	Décollement	Décohésion de l'int. de fe. ...et.1 ; Choc thermique	DiVi	DeAd ; PEs ; Décohésion du verre feuilleté
		1 à 10	Migration de liquides	Causes D (et.1 à 9)	DiVi	PEs
	Intercalaire de feuilletage / verre intérieur	0	Délamination	Réalisation du verre feuilleté (mauvais lavage, mauvaise mise en œuvre, qualité de l'intercalaire)	DiVi	DiAd ; NC
		1 ; 2	Décollement	Décohésion de l'int. de fe. ...et.1 ; Choc thermique	DiVi	DeAd ; PEs ; Décohésion du verre feuilleté
		1 à 10	Migration de liquides	Causes E (et.1 à 9)	DiVi	PEs
	Verre intérieur / gaz sec	3 à 15	Condensation	Humidité gaz sec ...et.2 à 14	DiVi	PEs
	Gaz sec/ couche basse émissivité	3 à 15	Condensation	Humidité gaz sec ...et.2 à 14	DiVi	PEs
Etre étanche (liquide, vapeur, gaz, végétaux, animaux, précipitations)	Verre extérieur (verre ext.)	1	Fissuration (a)	Δt int.-ext. (T°C basse, précipitations) ; Δt zone d'ombre ; choc thermique; choc mécanique	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux extérieur
		1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeEt	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux extérieur ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre int. et trempé
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeEt	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeEt	

Etre étanche (liquide, vapeur, gaz, végétaux, animaux, précipitations)	Verre extérieur (verre ext.)	2 à 6	Rupture (a)	Fissuration (a-b) verre ext...et.1 à 5	DeEt	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux extérieur ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre int. et trempé
		2 à 5	Fissuration (b)	idem Fissuration (b) verre ext. (être trans.) …et.2 à 5	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		2 à 7	Fissuration (c)	idem Fissuration (c) verre ext. (être trans.) …et.2 à 7	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux (c. 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11)
		3 à 8	Rupture (b)	idem Rupture (b) verre ext. (être trans.) ...et.3 à 8	DeEt	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux (c. 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11) ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre tr.
		2 à 7	Fissuration (d)	idem Fissuration (d) verre ext. (être trans.) …et.2 à 7	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		3 à 8	Rupture (c)	idem Rupture (c) verre ext. (être trans.) ...et.3 à 8	DeEt	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre int.
		4 à 9	Fissuration (e)	idem Fissuration (e) verre ext. (être trans.) …et.3 à 8	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur
		5 à 10	Rupture (d)	idem Rupture (d) verre ext. (être trans.) ...et.5 à 10	DeEt	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur ; Défaillance vitrage
	Verre intérieur (verre int.)	2 à 7	Fissuration (c)	idem Fissuration (c) verre int. (être trans.) …et.2 à 7	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		3 à 8	Rupture (b)	idem Rupture (b) verre int. (être trans.) ...et.3 à 8	DeEt	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux; Report des sollicitations mécaniques sur le verre tr.
		4 à 9	Fissuration (e)	idem Fissuration (e) verre int. (être trans.) …et.4 à 9	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur
		5 à 10	Rupture (d)	idem Rupture (d) verre int. (être trans.) ...et.5 à 10	DeEt	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur ; Défaillance vitrage
	Verre trempé (verre tr.)	1	Fissuration (a)	Δt int.-ext. (T°C basse, précipitations) ; Δt zone d'ombre ; choc thermique; choc mécanique	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux intérieur
		1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeEt	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux intérieur ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre feuilleté
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeEt	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeEt	
		2 à 6	Rupture (a)	idem Rupture (a) verre tr. (être trans.) ...et.2 à 6	DeEt	
		2 à 5	Fissuration (b)	idem Fissuration (b) verre tr. (être trans.) ...et.2 à 5	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		3 à 9	Fissuration (c)	idem Fissuration (c) verre tr. (être trans.) ...et.3 à 9	DeEt	DiVi ; DiIn ; DiRM ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		4 à 10	Rupture (b)	idem Rupture (b) verre tr. (être trans.) ...et.4 à 10	DeEt	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux ; Défaillance vitrage
	Menuiserie (men.)	1	Fissuration (a)	Choc dur + T°C < 10°C ; Efforts de compression, traction, cisaillement	DeEt	DiRM ; DiIn ; DiMP ; DiATB ; PEs

Etre étanche (liquide, vapeur, gaz, végétaux, animaux, précipitations)	Menuiserie (men.)	1 ; 2	Fissuration (b)	[(Vrillement men. ...et.0-1) ou (Craquelures men. ...et.1) ou (Thermo-oxydation men. ...et.1) ou (Hydrolyse men. ...et.1) ou (Migration des adjuvants men. ...et.1) ou (Réaction chimique men. ...et.1) ou (Gonflement men. ...et.1)] + éventuellement (chocs durs ; efforts de compressions, traction, cisaillement)	DeEt	DiATB ; DiRM ; DiIn ; DiMP ; PEs
		2 ; 3	Rupture	Fissuration (a-b) men. et.1-2	DeEt	DeATB ; DeRM ; DeIn ; DeMP ; PEs ; Chute du vitrage
	Joint de calfeutrement extérieur (joint calf. ext.)	2 à 5	Fissuration	Fatigue due à [(déformation (a-b) verre ext et/ ou int et / ou trempé ...et.1 à 4) et/ou (Dilatation / Contraction écarteur ...et.0-1) et/ou (Bombement écarteur ...et.1)] + éventuellement [Echauffement joint calf. ext. ...et.0 ; Vrillement joint calf. ext. ...et.0] ; Craquelures joint calf. ext. ...et.1 ; Durcissement joint calf. ext. ...et.1	DeEt	DiRM ; DiIn ; DiMP ; Infiltration d'agents environnementaux
		3 à 6	Rupture	Fissuration joint calf. ext. ...et.2 à 5	DeEt	DeRM ; DeIn ; DeMP ; Infiltration d'agents environnementaux ; Chute du vitrage accélérée par la rupture du joint ét.3 à 6 et la rupture du joint adh. couche ét.3 à 8
	Joint de calfeutrement intérieur (joint calf. int.)	2 à 5	Fissuration	Fatigue due à [(déformation (a-b) verre ext et/ ou int et / ou trempé ...et.1 à 4) et/ou (Dilatation / Contraction écarteur ...et.0-1) et/ou (Bombement écarteur ...et.1)] + éventuellement [Echauffement joint calf. int. ...et.0 ; Vrillement joint calf. int. ...et.0] ; Craquelures joint calf. int. ...et.1 ; Durcissement joint calf. int. ...et.1	DeEt	DiRM ; DiIn ; DiMP ; Infiltration d'agents environnementaux
		3 à 6	Rupture	Fissuration joint calf. int. ...et.2 à 5	DeEt	DeRM ; DeIn ; DeMP ; Infiltration d'agents environnementaux ; Chute du vitrage accélérée par la rupture du joint ét.3 à 6 et la rupture du joint adh. couche ét.3 à 8
	Verre extérieur / joint de calfeutrement extérieur	1 à 3	Espacement	Vrillement joint calf. ext. ...et.0 ; Durcissement joint calf. ext. ...et.1 ; Déformation joint calf. ext. 1-2	DeEt	Infiltration d'agents environnementaux
	Verre trempé / joint de calfeutrement intérieur	1 à 3	Espacement	Vrillement joint calf. int. ...et.0 ; Durcissement joint calf. int. ...et.1 ; Déformation joint calf. int. 1-2	DeEt	Infiltration d'agents environnementaux
	Menuiserie / joint de calfeutrement extérieur	1 à 3	Espacement	Vrillement joint calf. ext. ...et.0 ; Durcissement joint calf. ext. ...et.1 ; Déformation joint calf. ext. 1-2	DeEt	Infiltration d'agents environnementaux
	Menuiserie / joint de calfeutrement intérieur	1 à 3	Espacement	Vrillement joint calf. int. ...et.0 ; Durcissement joint calf. int. ...et.1 ; Déformation joint calf. int. 1-2	DeEt	Infiltration d'agents environnementaux extérieurs
Stopper le rayonnement infrarouge	Couche basse émissivité (cou. b. émi.)	0	Décollement	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (mauvais lavage et processus, qualité du matériau)	DiSRI	DiRM ; DiIn ; DiVi ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		0	Oxydation (a)	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (mauvais processus, stockage, humidité) ; Lavage (non adaptée, eau)	DiSRI	DiRM ; DiIn ; DiVi ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		1 à 13	Oxydation (b)	Composés nocifs (acide) dus à [Causes B (et.1 à 12) ; Mauvaise composition du gaz sec ...et.0]	DiSRI	DiVi ; DiRM ; DiIn ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11) ; idem oxydation (a) cou. b. émi.
		0	Inhomogénéité	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (mauvais processus, qualité du matériau)	DiSRI	DiIn ; DiVi ; PEs

Stopper le rayonnement infrarouge	Couche basse émissivité (cou. b. émi.)	0	Abrasion	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (manipulateurs, outils de manutention et de lavage, conditions de stockage) ; Lavage (machine non adaptée, eau)	DiSRI	DiRM ; DiIn ; DiVi ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		2 à 10	Fissuration	Fissuration (a-b-c) du verre tr. ...et.1 à 9	DiSRI	DiVi
		3 à 11	Rupture	Rupture (a-b) du verre tr. ...et.2 à 10	DeSRI	DeVi
		2 à 5	Décollement	Déformation (a-b) verre tr. …et.1 à 4	DiSRI	DiVi ; DiRM ; DiIn ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		3 à 15	Ternissure	(Humidité gaz sec ...et.2 à 14) + Composés soufrés dus à [Causes B (et.1 à 12) ; Mauvaise composition du gaz sec ...et.0]	DiSRI	DiVi ; DiIn ; PEs
Stopper les T°C et le bruit	Verre extérieur (verre ext.)	1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeATB	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeEt ; Infiltration d'agents environnementaux extérieur ; Report des sollicitations sur le verre int. et trempé
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeATB	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeATB	
		2 à 6	Rupture (a)	idem Rupture (a) verre ext. (être trans.) ...et.2 à 6	DeATB	
		3 à 8	Rupture (b)	idem Rupture (b) verre ext. (être trans.) ...et.3 à 8	DeATB	DeVi ; DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux (c. 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11) ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre tr.
		3 à 8	Rupture (c)	idem Rupture (c) verre ext. (être trans.) ...et.3 à 8	DeATB	DeEt ; DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre int.
		5 à 10	Rupture (d)	idem Rupture (d) verre ext. (être trans.) ...et.5 à 10	DeATB	DeEt ; DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur ; Défaillance vitrage
	Intercalaire de feuilletage (int. de fe.)	1	Décomposition	T°C > 80°C	DeATB	DeVi ; DeRM ; DeIn ; DeMP ; PEs ; Décohésion du verre feuilleté ; Influence sur l'adhérence des interfaces ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux
	Verre intérieur (verre int.)	1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeATB	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeEt ; Possibilité de passage d'agents environnementaux ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre ext. et trempé
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeATB	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeATB	
		2 à 6	Rupture (a)	idem Rupture (a) verre int. (être trans.) ...et.2 à 6	DeATB	
		3 à 8	Rupture (b)	idem Rupture (b) verre int. (être trans.) ...et.3 à 8	DeATB	DeVi ; DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux; Report des sollicitations mécaniques sur le verre tr.
		3 à 8	Rupture (c)	idem Rupture (c) verre int. (être trans.) ...et.3 à 8	DeATB	DeVi ; DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux; Report des sollicitations mécaniques sur le verre ext.
		5 à 10	Rupture (d)	idem Rupture (d) verre int. (être trans.) ...et.5 à 10	DeATB	DeVi ; DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur ; Défaillance vitrage
	Gaz sec	2 à 5	Variation de géométrie	Déformation (a-b) verre ext. ...et.1 à 4 et/ou Déformation (a-b) verre int. ...et.1 à 4 et/ou Déformation (a-b) verre tr. ...et.1 à 4	DiATB	-
	Verre trempé (verre tr.)	1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeATB	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeEt ; Infiltration d'agents environnementaux intérieur ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre feuilleté
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeATB	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeATB	

Stopper les T°C et le bruit	Verre trempé (verre tr.)	2 à 6	Rupture (a)	idem Rupture (a) verre tr. (être trans.) ...et.2 à 6	DeATB	DeVi ; DeRM ; DeIn ; PEs ; DeEt ; Infiltration d'agents environnementaux intérieur ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre feuilleté
		4 à 10	Rupture (b)	idem Rupture (b) verre tr. (être trans.) ...et.4 à 10	DeATB	DeVi ; DeEt ; DeRM ; DeIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux ; Défaillance vitrage
	Joint d'adhérence verre (joint adh. verre)	1	Durcissement	Ozone + U.V.	DiATB	DiIn ; DiRM ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité des interfaces
		1 à 6	Vieillissement prématuré (incompatibilité chimique)	Dépôt cou. b. émi. du à [Décollement cou. b. émi. ...et.0-2 à 5 ; Oxydation (a) cou. b. émi. ...et. 0 ; Abrasion cou. b. émi ...et.0]	DiATB	DiRM ; DiIn ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité et l'adhérence des interfaces
	Joint d'adhérence couche (joint adh. couche)	1	Durcissement	Ozone + U.V.	DiATB	DiIn ; DiRM ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité des interfaces
		1 à 6	Vieillissement prématuré (incompatibilité chimique)	Dépôt cou. b. émi. du à [Décollement cou. b. émi. ...et.0-2 à 5 ; Oxydation (a) cou. b. émi. ...et. 0 ; Abrasion cou. b. émi ...et.0] ; Contact cou. b. émi. et joint adh. couche du à [Absence d'émargement de la cou. b. émi. ...et.0 ; Matériau (joint adh. couche) surabondant ...et.0]	DiATB	DiRM ; DiIn ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité et l'adhérence des interfaces
	Joint d'étanchéité (joint et.)	1	Durcissement	Oxygène ; T°C élevée ; Ozone	DiATB	DiRM ; DiIn ; Influence sur l'adhérence et l'étanchéité de l'interface
	Menuiserie (men.)	1	Fissuration (a)	Choc dur + T°C < 10°C ; Efforts de compression, traction, cisaillement	DiATB	DeEt ; DiRM ; DiIn ; DiMP ; PEs
		1 ; 2	Fissuration (b)	idem Fissuration (b) men. (être étan.) ...et.1-2	DiATB	DeEt ; DiRM ; DiIn ; DiMP ; PEs
		2 ; 3	Rupture	Fissuration (a-b) men. et.1-2	DeATB	DeEt ; DeRM ; DeIn ; DeMP ; PEs ; Chute du vitrage
	Joint de calfeutrement extérieur (joint calf. ext.)	1	Durcissement	Oxygène ; U.V. ; T°C ; Ozone	DiATB	DiRM ; DiIn ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité des interfaces
	Joint de calfeutrement intérieur (joint calf. int.)	1	Durcissement	Oxygène ; U.V. ; T°C ; Ozone	DiATB	DiRM ; DiIn ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité des interfaces
Absorber la vapeur	Absorbeur d'humidité (abs. hum.)	0	Perte de matériau	Mise en forme de l'écarteur (opérateur, mode opératoire)	DiAb	DiRM ; DiIn ; NC
		0	Absence de matériau	Mise en forme de l'écarteur (mauvaise livraison)	DeAb	DiRM ; DiIn ; NC
		1 à 13	Saturation	[Humidité gaz sec ...et.0 ; (Fissuration écarteur ...et.1; Craquelures écarteur ...et.1) + Causes A ; Perforation (a) écarteur ...et.1 à 11 ; Causes B] + éventuellement [Perte de matériau abs. hum. ...et.0 ; Absence de matériau abs. hum. ...et.0]	DeAb	Influence sur l'humidité du gaz sec
Résister mécaniquement (actions mécaniques, vent, précipitations, bruit, animaux)	Verre extérieur (verre ext.)	0	Délamination	Réalisation du verre feuilleté (mauvais lavage, mauvaise mise en œuvre, qualité du matériau)	Décohésion mécanique	DiVi ; DiIn ; PEs ; Perte de sécurité
		0	Abrasion	Lavage (machine non adaptée) ; Stockage, transport, manutention du vitrage	Fragilisation du matériau (DiRM)	DiVi ; DiIn ; PEs
		0	Irisation	Stockage, transport, manutention du vitrage (eau + acide sans ventilation)	DiRM	DiVi ; DiIn ; PEs
		0	Echauffement	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C élevée)	Fragilisation du matériau (DiRM)	DiIn

Résister mécaniquement (actions mécaniques, vent, précipitations, bruit, animaux)	Verre extérieur (verre ext.)	1	Abrasion	Entretien avec produit non adapté (abrasif)	Fragilisation du matériau (DiRM)	DiVi ; DiIn ; PEs
		0	Absence de rodage	Réalisation du verre feuilleté (intervenants)	Fragilisation du matériau (DiRM)	Danger de coupure ; NC
		0	Torsion / gauchissement	Stockage, transport, manutention du vitrage (opérateur, mauvaise méthode de stockage)	DeRM - Rejet avant mise en œuvre	Défaillance de l'intégrité; NC
		0	Fluage	Stockage, transport, manutention du vitrage (opérateur, mauvaise méthode de stockage, T°C élevée)	Fragilisation du matériau (DiRM)	PEs ; Difficulté de mise en œuvre
		0	Epaufrure	Stockage, transport, manutention du vitrage (chocs)	DiRM	PEs
		0	Casse thermique	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C élevée)	DeRM - Rejet avant mise en œuvre	NC ; DeIn
		1	Fissuration (a)	Δt int.-ext. (T°C basse, précipitations) ; Δt zone d'ombre ; choc thermique; choc mécanique	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux extérieur
		1	Dévitrification	T°C > 600°C	Décohésion mécanique	DiVi ; DiIn ; PEs
		1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux extérieur ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre int. et trempé
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeRM	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeRM	
		2 à 6	Rupture (a)	Fissuration (a-b) verre ext...et.1 à 5	DeRM	
		1	Fluage	T°C élevée ; Radiations I.R.	Fragilisation du matériau (DiRM)	PEs ; Difficulté de mise en œuvre
		1	Déformation (a)	T°C élevée ; Radiations I.R. ; Poids des charges ; Vent ; Pression ; Force appliquée sur le vitrage	DiRM	DiVi ; DiIn ; PEs
		1 à 4	Déformation (b)	idem déformation verre ext. (être trans.)…et. 1-2-3-4	DiRM	DiVi ; DiIn ; PEs
		2 à 5	Fissuration (b)	idem Fissuration (b) verre ext. (être trans.) …et.2 à 5	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		2 à 7	Fissuration (c)	idem Fissuration (c) verre ext. (être trans.) …et.2 à 7	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux (c. 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11)
		3 à 8	Rupture (b)	idem Rupture (b) verre ext. (être trans.) ...et.3-4-5-6-7-8	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux (c. 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11) ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre tr.
		2 à 7	Fissuration (d)	idem Fissuration (d) verre ext. (être trans.) …et.2 à 7	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		3 à 8	Rupture (c)	idem Rupture (c) verre ext. (être trans.) ...et.3-4-5-6-7-8	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre int.
		4 à 9	Fissuration (e)	idem Fissuration (e) verre ext. (être trans.) …et.3-4-5-6-7-8	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur
		5 à 10	Rupture (d)	idem Rupture (d) verre ext. (être trans.) ...et.5-6-7-8-9-10	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur ; Défaillance vitrage
	Intercalaire de feuilletage	0	Bullage	Réalisation du verre feuilleté (mauvais lavage, qualité du matériau, T°C élevée)	DiRM	DiVi ; PEs ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux

Résister mécaniquement (actions mécaniques, vent, précipitations, bruit, animaux)	Intercalaire de feuilletage (int. de fe.)	0	Echauffement	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C > 60°C)	DiRM	DiIn ; DiMP
		1	Décomposition	T°C > 80°C	DeRM	DeVi ; DeATB ; DeIn ; DeMP ; PEs ; Décohésion du verre feuilleté ; Influence sur l'adhérence des interfaces ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux
	Verre intérieur (verre int.)	0	Délamination	Réalisation du verre feuilleté (mauvais lavage, mauvaise mise en œuvre, qualité du matériau)	Décohésion mécanique	DiVi ; DiIn ; PEs ; Perte de sécurité
		0	Abrasion	Lavage (machine non adaptée) ; Stockage, transport, manutention du vitrage	Fragilisation du matériau (DiRM)	DiVi ; DiIn ; PEs
		0	Absence de rodage	Réalisation du verre feuilleté (intervenants)	Fragilisation du matériau (DiRM)	Danger de coupure ; NC
		0	Torsion / gauchissement	Stockage, transport, manutention du vitrage (opérateur, mauvaise méthode de stockage)	DeRM - Rejet avant mise en œuvre	DeIn ; NC
		0	Fluage	Stockage, transport, manutention du vitrage (opérateur, mauvaise méthode de stockage, T°C élevée)	Fragilisation du matériau (DiRM)	PEs ; Difficulté de mise en œuvre
		0	Echauffement	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C élevée)	Fragilisation du matériau (DiRM)	DiIn
		0	Casse thermique	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C élevée)	DeRM - Rejet avant mise en œuvre	NC ; DeIn
		1	Fissuration (a)	Δt int.-ext. (T°C basse, précipitations) ; Δt zone d'ombre ; choc thermique; choc mécanique	DiRM	DiVi ; DiIn ; PEs ; Possibilité de passage d'agents environnementaux
		1	Dévitrification	T°C > 600°C	Décohésion mécanique	DiVi ; DiIn ; PEs
		1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeRM	DeVi DeIn ; PEs ; DeATB ;Possibilité de passage d'agents environnementaux ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre ext. et trempé
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeRM	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeRM	
		2 à 6	Rupture (a)	idem Rupture (a) verre int. (être trans.) ...et.2 à 6	DeRM	
		1	Fluage	T°C élevée ; Radiations I.R.	Fragilisation du matériau (DiRM)	PEs ; Difficulté de mise en œuvre
		1	Déformation (a)	T°C élevée ; Radiations I.R. ; Poids des charges ; Vent ; Pression ; Force appliquée sur le vitrage	DiRM	DiVi ; DiIn ; PEs
		1 à 4	Déformation (b)	idem déformation (b) verre ext. (être trans.)…et. 1-2-3-4	DiRM	DiVi ; DiIn ; PEs
		2 à 5	Fissuration (b)	idem Fissuration (b) verre int. (être trans.) …et.2 à 5	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Possibilité de passage d'agents environnementaux
		2 à 7	Fissuration (c)	idem Fissuration (c) verre int. (être trans.) …et.2 à 7	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		3 à 8	Rupture (b)	idem Rupture (b) verre int. (être trans.) …et.3-4-5-6-7-8	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux; Report des sollicitations mécaniques sur le verre tr.
		2 à 7	Fissuration (d)	idem Fissuration (d) verre int. (être trans.) …et.2 à 7	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux
		3 à 8	Rupture (c)	idem Rupture (c) verre int. (être trans.) …et.3-4-5-6-7-8	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux; Report des sollicitations mécaniques sur le verre ext.

Résister mécaniquement (actions mécaniques, vent, précipitations, bruit, animaux)	Verre intérieur (verre int.)	4 à 9	Fissuration (e)	idem Fissuration (e) verre int. (être trans.) …et.4-5-6-7-8-9	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur
		5 à 10	Rupture (d)	idem Rupture (d) verre int. (être trans.) …et.5-6-7-8-9-10	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux dans le milieu intérieur ; Défaillance vitrage
		0	Décollement	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (mauvais lavage et processus, qualité du matériau)	DiRM	DiVi ; DiIn ; DiSRI ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		0	Oxydation (a)	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (mauvais processus, stockage, humidité) ; Lavage (non adaptée, eau)	DiRM	DiVi ; DiIn ; DiSRI ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
		1 à 13	Oxydation (b)	Composés nocifs (acide) dus à [Causes B (et.1 à 12) ; Mauvaise composition du gaz sec ...et.0]	DiRM	DiVi ; DiSRi ; DiIn ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11) ; idem oxydation (a) cou. b. émi.
		0	Abrasion	Mise en œuvre de la cou. b. émi. sur le verre tr. (manipulateurs, outils de manutention et de lavage, conditions de stockage) ; Lavage (machine non adaptée, eau)	DiRM	DiVi ; DiIn ; DiSRI ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
	Couche basse émissivité (cou. b. émi.)	2 à 5	Décollement	Déformation (a-b) verre tr. …et.1 à 4	DiRM	DiVi ; DiSRI ; DiIn ; PEs ; Dépôt (c. 3, 7, 8, 10, 11)
	Verre trempé (verre tr.)	0	Abrasion	Lavage (machine non adaptée) ; Stockage, transport, manutention du vitrage	Fragilisation du matériau (DiRM)	DiVi ; DiIn ; PEs
		1	Abrasion	Entretien avec produit non adapté (abrasif)	Fragilisation du matériau (DiRM)	DiVi ; DiIn ; PEs
		0	Torsion / gauchissement	Stockage, transport, manutention du vitrage (opérateur, mauvaise méthode de stockage) ; Processus de trempe thermique	DeRM - Rejet avant mise en œuvre	DeIn ; NC
		0	Fluage	Stockage, transport, manutention du vitrage (opérateur, mauvaise méthode de stockage, T°C élevée)	Fragilisation du matériau (DiRM)	PEs ; Difficulté de mise en œuvre
		0	Epaufrure	Stockage, transport, manutention du vitrage (chocs)	DiRM	PEs
		0	Echauffement	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C élevée)	Fragilisation du matériau (DiRM)	DiIn
		0	Casse thermique	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C élevée)	DeRM - Rejet avant mise en œuvre	NC ; DeIn
		1	Fissuration (a)	Δt int.-ext. (T°C basse, précipitations) ; Δt zone d'ombre ; choc thermique; choc mécanique	DiRM	DiVi ; DiIn ; PEs ; DeEt ; Infiltration d'agents environnementaux intérieur
		1	Dévitrification	T°C > 600°C	Décohésion mécanique	DiVi ; DiIn ; PEs
		1	Casse thermique	Choc thermique ; Incendie ; Conditions de stockage (U.V.)	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux intérieur ; Report des sollicitations mécaniques sur le verre feuilleté
		1	Casse	Vent violent ; choc mécanique	DeRM	
		1	Rupture spontanée	Inclusion de sulfure de Nickel + Contrainte thermique ou mécanique	DeRM	
		2 à 6	Rupture (a)	idem Rupture (a) verre tr. (être trans.) ...et.2 à 6	DeRM	
		1	Fluage	T°C élevée ; Radiations I.R.	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux intérieur
		1	Déformation (a)	T°C élevée ; Radiations I.R. ; Poids des charges ; Vent ; Pression ; Force appliquée sur le vitrage	DiRM	DiVi ; DiIn ; PEs
		1 à 4	Déformation (b)	idem déformation (b) verre ext. (être trans.)…et. 1 à 4	DiRM	DiVi ; DiIn ; PEs

Résister mécaniquement (actions mécaniques, vent, précipitations, bruit, animaux)	Verre trempé (verre tr.)	2 à 5	Fissuration (b)	idem Fissuration (b) verre tr. (être trans.) ...et.2 à 5	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		3 à 9	Fissuration (c)	idem Fissuration (c) verre tr. (être trans.) ...et.3 à 9	DiRM	DiVi ; DeEt ; DiIn ; PEs ; Infiltration d'agents environnementaux
		4 à 10	Rupture (b)	idem Rupture (b) verre tr. (être trans.) ...et.4 à 10	DeRM	DeVi ; DeEt ; DeIn ; PEs ; DeATB ; Infiltration d'agents environnementaux ; Défaillance vitrage
	Joint d'adhérence verre (joint adh. verre)	0	Echauffement	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C élevée)	DiRM	DiIn ; DiMP ; Influence sur l'adhérence des interfaces
		1	Durcissement	Ozone + U.V.	DiRM	DiIn ; DiATB ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité des interfaces
		1	Craquelures	Ozone	DiRM	DiIn
		1	Désagrégation de surface	U.V.	DiRM	DiIn
		1 à 6	Vieillissement prématuré (incompatibilité chimique)	idem Vieillissement prématuré joint adh. verre (stop. T°C et b.) ...et.1 à 6	DiRM	DiATB ; DiIn ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité et l'adhérence des interfaces
		2 à 7	Fissuration	Fatigue due à [(déformation (a-b) verre ext et/ ou int et / ou trempé ...et.1 à 4) et/ou (Dilatation / Contraction écarteur ...et.0-1) et/ou (Bombement écarteur ...et.1)] + éventuellement [Echauffement joint adh. verre ...et.0 ; Matériau (joint adh. verre) insuffisant ...et.0] ; Durcissement joint adh. verre ...et.1 ; Craquelures joint adh. verre ...et. 1 ; Désagrégation de surface joint adh. verre ...et.1 ; Vieillissement prématuré joint adh. verre ...et.1 à 6	DiRM	DiIn ; DiMP ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux
		3 à 8	Rupture	Fissuration joint adh. verre ...et.2 à 7	DeRM	DeIn ; DeMP ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux ; Possibilité de chute du vitrage
	Joint d'adhérence couche (joint adh. couche)	0	Echauffement	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C élevée)	DiRM	DiIn ; DiMP ; Influence sur l'adhérence des interfaces
		1	Durcissement	Ozone + U.V.	DiRM	DiIn ; DiATB ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité des interfaces
		1	Craquelures	Ozone	DiRM	DiIn
		1	Désagrégation de surface	U.V.	DiRM	DiIn
		1 à 6	Vieillissement prématuré (incompatibilité chimique)	idem Vieillissement prématuré joint adh. couche (stop. T°C et b.) ...et.1 à 6	DiRM	DiATB ; DiIn ; DiMP ; Influence sur l'étanchéité et l'adhérence des interfaces
		2 à 7	Fissuration	Fatigue due à [(déformation (a-b) verre ext et/ ou int et / ou trempé ...et.1 à 4) et/ou (Dilatation / Contraction écarteur ...et.0-1) et/ou (Bombement écarteur ...et.1)] + éventuellement [Echauffement joint adh. couche ...et.0 ; Matériau (joint adh. couche) insuffisant ...et.0] ; Durcissement joint adh. couche ...et.1 ; Craquelures joint adh. couche ...et. 1 ; Désagrégation de surface joint adh. couche ...et.1 ; Vieillissement prématuré joint adh. couche ...et.1 à 6	DiRM	DiIn ; DiMP ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux
		3 à 8	Rupture	Fissuration joint adh. couche ...et.2 à 7	DeRM	DeIn ; DeMP ; Possibilité d'infiltration d'agents environnementaux ; Possibilité de chute du vitrage
	Joint d'étanchéité (joint et.)	0	Echauffement	Stockage, transport, manutention du vitrage (T°C>100°C)	DiRM	DiIn ; Influence sur l'adhérence des interfaces

Annexe 13

Référentiels et données temporelles de la fenêtre

Le tableau suivant regroupe uniquement les référentiels de la fenêtre pour lesquels des données temporelles sont disponibles :

Réf.	Entité géométrique	*AG*	Entité phénoménologique	*AP*	Nature et intensité des sollicitations environnementales
*R*1	Fenêtre fixe décrite à la figure 57 de la partie C	*Pro*	Ensemble des scénarii décrit à la figure 61 de la partie C	*Sci*	*Nature* : ensemble des causes décrites à la figure 61 *Intensité* : Normale
*R*2	Joint adhérence verre en silicone	*Com*	Durcissement	*Ph*	*Nature* : Ozone + U.V. *Intensité* : Normale
*R*3	Ecarteur en aluminium	*Com*	Corrosion par piqûres + Perforation	*Ph*	*Nature* : Humidité ; Produits halogènes (chlore, fluor, brome, iode) *Intensité* : Importante
*R*4	Joint adhérence couche en silicone	*Com*	Durcissement	*Ph*	*Nature* : Ozone + U.V. *Intensité* : Normale
*R*5	Joint adhérence couche en silicone	*Com*	Vieillissement prématuré	*Ph*	*Nature* : Incompatibilité chimique (entre la couche basse émissivité et le joint d'adhérence) *Intensité* : Importante
*R*6	Joint étanchéité en butyle	*Com*	Durcissement + Fissuration	*Ph*	*Nature* : Oxygène ; Ozone ; T°C élevée *Intensité* : Normale
*R*7	Menuiserie en PVC	*Com*	Fissuration	*Ph*	*Nature* : Choc dur + T°C < 10°C ; Efforts de compression, traction, cisaillement *Intensité* : Normale
*R*8	Menuiserie en PVC	*Com*	Durcissement	*Ph*	*Nature* : Oxygène ; Ozone ; T°C ; U.V. *Intensité* : Normale
*R*9	Joint calfeutrement extérieur en EPDM	*Com*	Durcissement	*Ph*	*Nature* : Oxygène ; Ozone ; T°C ; U.V. *Intensité* : Normale

AG : axe géométrique ; AP : axe phénoménologique ; Com : composant ; Pro : produit ; Ph : phénomène ; Sci : scénarii

Le tableau suivant récapitule les données temporelles collectées et utilisées pour évaluer la durée de chacun des référentiels définis ci-dessus :

Réf.	N°	Entité géométrique	Entité phénoménologique	Donnée brute	Source
*R*1	Donnée 1	Fenêtre en PVC avec vitrage isolant	Durée de vie	50 ans	[TRI, 90]
	Donnée 2	Verre isolant	Durée de vie	En moyenne 20 ans, au minimum 15 ans	[PIB, 95]
	Donnée 3	Verre de fenêtre	Durée de vie	30 ans	[EDI, 03b]
	Donnée 4	Simple vitrage	Durée de vie	De 60 à 100 ans en moyenne 80 ans	[EDI, 03c]
	Donnée 5	Verre feuilleté isolant	Durée de vie	En moyenne 25 ans à 5 ans près	[EDI, 03c]
	Donnée 6	Fenêtre en PVC	Durée de vie	De 20 à 30 ans	[EDI, 03d]
	Donnée 7	Fenêtre en PVC	Durée de vie	De 45 à 75 ans en moyenne 50 ans	[EDI, 03e]

*R*1	Donnée 8	Fenêtre en PVC	Durée de vie	De 30 à 70 ans	[EDI, 03b]
	Donnée 9	Fenêtre en PVC	Durée de vie	De 25 à 30 ans	[EDI, 03f]
	Donnée 10	Fenêtre en PVC	Durée de vie	25 ans	[EDI, 03g]
*R*2	Donnée 11	Système d'étanchéité (mastic) de fenêtre	Réfection localisée	Tous les 5 ans	[PER, 95]
	Donnée 12	Système d'étanchéité (mastic) de fenêtre	Réfection totale	Tous les 10 ans	[PER, 95]
	Donnée 13	Garniture (mastic) de fenêtre	Remplacement ponctuel	Tous les 10 ans	[PER, 95]
	Donnée 14	Garniture (mastic) de fenêtre	Remplacement intégral	Entre 15 et 20 ans	[PER, 95]
	Donnée 15	Joint de fenêtre en silicone	Durée de vie	< 20 ans	[EDI, 03a]
*R*3	Donnée 16	Aluminium	Vitesse de corrosion de l'aluminium (hypothèse : épaisseur écarteur de 0,1 mm)	De 20 à 40 ans et en moyenne 26 ans	[NAT, 06]
*R*4	Identiques au *R*2				
*R*5	Identiques au *R*2				
*R*6	Données 11 à 14				
*R*7	Donnée 17	Cadre d'une fenêtre en PVC	Durée de vie	20 ans	[PIB, 95]
	Donnée 18	Cadre d'une fenêtre en PVC	Durée de vie	En moyenne 50 ans, au minimum 40 ans	[PIB, 95]
	Donnée 19	Cadre d'une fenêtre en PVC	Durée de vie	De 30 à 40 ans en moyenne 35 ans	[TRI, 90]
	Donnée 20	Cadre d'une fenêtre en PVC	Propriétés mécaniques inchangées	De 20 à 25 ans	[YAR, 02]
	Donnée 21	Cadre d'une fenêtre en PVC	Rupture	142 ans	[YAR, 02]
	Donnée 22	Cadre d'une fenêtre en PVC	Durée de vie	En moyenne 50 ans à 10 ans près	[EDI, 03c]
*R*8	Données 20 et 21				
*R*9	Donnée 23	Profilés en caoutchouc pour fenêtre	Remplacement ponctuel	Tous les 5 ans	[PER, 95]
	Donnée 24	Profilés en caoutchouc pour fenêtre	Remplacement complet	Tous les 10 ans	[PER, 95]
	Donnée 25	Joint de vitrage en EPDM pour menuiserie en PVC	Remplacement	Tous les 15 ans	[PER, 95]

Les références bibliographiques des sources cités dans le tableau ci-avant sont les suivantes :

[EDI, 03a]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Addleson & Rice.

[EDI, 03b]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : 7 DBMC.

[EDI, 03c]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Guideline for sustainable building.

[EDI, 03d]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003.

[EDI, 03e]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Kürty.

[EDI, 03f]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : 8 DBMC.

[EDI, 03g]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Wypych.

[NAT, 06]
NATESAN M., VENKATACHARI G., PALANISWAMY N. Kinetics of atmospheric corrosion of mild steel, zinc, galvanized iron and aluminium at 10 exposure stations in India. Corrosion science, 2006, article sous presse.

[PER, 95]
PERRET J. Guide de la maintenance des bâtiments. Paris : Le Moniteur, 1995, 431 p.

[PIB, 95]
PIBAT. Vieillissement des éléments de construction et coût d'entretien – Données pour l'entretien et la rénovation des immeubles d'habitation. Berne : Office fédéral des questions conjoncturelles, 1995, 110 p.

[TRI, 90]
TRIBU. Evaluation des données disponibles concernant la durabilité des matériaux, composants et équipements en vue de leur utilisation pour des outils de maintenance. PARIS : Techniques Recherches et Innovations pour le Bâtiment et l'Urbain, 100 p.

[YAR, 02]
YARAHMADI N., JAKUBOWICZ I.. Polymeric Materials in Sustainable Building. **In** : Sustainable Building 2002, 23 – 25 septembre 2002, Oslo.

Annexe 14

Grilles de qualité des données temporelles de la fenêtre

Donnée 1 :

			Notes
Donnée brute	Modélisation	CE_1	1 / 3
	Hypothèses de modélisation	CE_2	2 / 3
	Données de base	CE_3	2 / 3
	Source	CE_4	1
	Censure	CE_5	0
Donnée élaborée	Représentativité	CE_6	2 / 3
Méthode de traitement des données élaborées	Correspondance de l'échelle géométrique	CE_7	1
	Correspondance de l'entité géométrique	CE_8	2 / 3
	Correspondance de l'échelle phénoménologique	CE_9	1
	Correspondance de l'entité phénoménologique	CE_{10}	1 / 3
	Correspondance des sollicitations	CE_{14}	2 / 3
	Entroprie	CE_{15}	0,441
		Masse de croyance	**0,62**

Donnée 2 :

	Notes
CE_1	1 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	2 / 3
CE_4	1
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	2 / 3
CE_8	2 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,441
Masse de croyance	**0,59**

Donnée 3 :

	Notes
CE_1	2 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	1
CE_4	1 / 3
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	2 / 3
CE_8	1 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,334
Masse de croyance	**0,56**

Donnée 4 :

	Notes
CE_1	2 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	1
CE_4	1
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	2 / 3
CE_8	0
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,73
Masse de croyance	**0,62**

Donnée 5 :

	Notes
CE_1	2 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	1
CE_4	1
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	2 / 3
CE_8	2 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,441
Masse de croyance	**0,65**

Donnée 6 :

	Notes
CE_1	1 / 3
CE_2	1 / 3
CE_3	1 / 3
CE_4	1 / 3
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	1 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,481
Masse de croyance	**0,49**

Donnée 7 :

	Notes
CE_1	2 / 3
CE_2	1 / 3
CE_3	1
CE_4	1 / 3
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	1 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,67
Masse de croyance	**0,58**

Donnée 8 :

	Notes
CE_1	2 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	1
CE_4	1 / 3
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	1 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,771
Masse de croyance	**0,62**

Donnée 9 :

	Notes
CE_1	2 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	1
CE_4	1 / 3
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	1 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,336
Masse de croyance	**0,58**

Donnée 10 :

	Notes
CE_1	2 / 3
CE_2	1 / 3
CE_3	1
CE_4	1 / 3
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	1 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,334
Masse de croyance	**0,56**

Donnée 11 :

	Notes
CE_1	1 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	2 / 3
CE_4	1
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	2 / 3
CE_9	1
CE_{10}	2 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,446
Masse de croyance	**0,65**

Donnée 12 :

	Notes
CE_1	1 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	2 / 3
CE_4	1
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	2 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,664
Masse de croyance	**0,64**

Donnée 13 :

	Notes
CE_1	1 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	2 / 3
CE_4	1
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	2 / 3
CE_9	1
CE_{10}	2 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,664
Masse de croyance	**0,67**

Donnée 14 :

	Notes
CE_1	1 / 3
CE_2	2 / 3
CE_3	2 / 3
CE_4	1
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	2 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	2 / 3
CE_{15}	0,506
Masse de croyance	**0,63**

Donnée 15 :

	Notes
CE_1	2 / 3
CE_2	1 / 3
CE_3	1
CE_4	1 / 3
CE_5	0
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	1
CE_9	1
CE_{10}	1 / 3
CE_{14}	1 / 3
CE_{15}	0,664
Masse de croyance	**0,61**

Donnée 16 :

	Notes
CE_1	1 / 3
CE_2	1
CE_3	2 / 3
CE_4	1
CE_5	2 / 3
CE_6	2 / 3
CE_7	1
CE_8	2 / 3
CE_9	1
CE_{10}	1
CE_{14}	1 / 3
CE_{15}	0,72
Masse de croyance	**0,75**

Annexe 15

Durées des phénomènes de la fenêtre fixe, stratégie d'obtention et indicateurs de qualité associés

Le tableau suivant récapitule les durées des phénomènes de la fenêtre fixe, les modes d'obtention de ces durées, ainsi que les indicateurs de qualité associés et la masse de croyance retenue en vue de l'agrégation de ces durées pour obtenir la durée des scénarii de la fenêtre :

Phénomène	Mode d'obtention	Durée obtenue	*Bel* (.)	*Pl* (.)	*P* (.) Masse représentée
Ph_1 : Fissuration de la menuiserie	**Unification** *Données utilisées :* 17 à 22 *Assemblage* : Intersection de l'EMC_{MM} avec faible cohérence (+ conflit) *Conflit* : 0,17 *Masse représentée* : 70%	[48 ; 51] ans	0,097	0,848	0,276
Ph_2 : Durcissement + Fissuration du joint d'étanchéité	**Unification** *Données utilisées :* 11 à 14 *Assemblage* : Intersection avec faible cohérence *Conflit* : 0,18 *Masse représentée* : 100%	[15 ; 18] ans	0,087	0,829	0,346
Ph_3 : Corrosion par piqûres + Perforation de l'écarteur	**Préparation d'une donnée unique** *Donnée utilisée* : 16	[22 ; 35] ans	-	-	0,25
Ph_4 : Saturation de l'absorbeur d'humidité	**Déclaration**	[3 ; 5] ans	-	-	0,25
Ph_{4bis} : Saturation de l'absorbeur d'humidité	**Déclaration**	[0 ; 2] ans	-	-	0,25
Ph_5 : Condensation sur la couche basse émissivité	**Déclaration**	Instantanée	-	-	0,25
Ph_6 : Oxydation de la couche basse émissivité	**Déclaration**	[0 ; 1] an	-	-	0,25
Ph_7 : Perte de matériau de l'absorbeur d'humidité	**Déclaration**	Instantanée	-	-	0,25
Ph_8 : Condensation sur le verre intérieur	**Déclaration**	Instantanée	-	-	0,25
Ph_9 : Durcissement + Décollement du joint d'étanchéité	Idem Ph_2				
Ph_{10} : Matériau insuffisant (joint adhérence couche)	**Déclaration**	Instantanée	-	-	0,25

Ph_{11} : Décollement du joint d'adhérence couche et du joint d'étanchéité	**Déclaration**	Cinétique « très rapide »	-	-	0,25
Ph_{12} : Vrillement du joint de calfeutrement extérieur	**Déclaration**	Instantanée	-	-	0,25
Ph_{13} : Espacement entre le verre extérieur et le joint de calfeutrement extérieur	**Déclaration**	Cinétique « très rapide »	-	-	0,25
Ph_{14} : Durcissement du joint de calfeutrement extérieur	**Unification** *Données utilisées :* 23 à 25 *Assemblage* : Intersection de l'EMC_{MM} avec faible cohérence (+ conflit) *Conflit* : 0,18 *Masse représentée* : 80%	[15 ; 18] ans	0,128	0,835	0,319
Ph_{15} : Durcissement du joint de calfeutrement intérieur	Idem Ph_{14}				
Ph_{16} : Durcissement du joint d'adhérence couche	**Unification** *Données utilisées :* 11 à 15 *Assemblage* : Intersection de l'EMC_{MM} avec faible cohérence (+ conflit) *Conflit* : 0,18 *Masse représentée* : 81%	[15 ; 18] ans	0,109	0,856	0,399
Ph_{17} : Durcissement du joint d'adhérence verre	Idem Ph_{16}				
Ph_{18} : Durcissement de la menuiserie	**Unification** *Données utilisées :* 20 à 21 *Assemblage* : Intersection de l'EMC_{MM} avec faible cohérence (+ conflit) *Conflit* : 0,06 *Masse représentée* : 67%	[23 ; 35] ans	0,223	0,954	0,395
Ph_{19} : Absence d'émargement de la couche basse émissivité	**Déclaration**	Instantanée	-	-	0,25
Ph_{20} : Vieillissement prématuré du joint d'adhérence couche	Idem Ph_{16}				
Ph_{21} : Cale inappropriée	**Déclaration**	Instantanée	-	-	0,25
Ph_{22} : Déformation du verre trempé	**Déclaration**	Cinétique « très rapide »	-	-	0,25
Ph_{23} : Fissuration du verre trempé	**Déclaration**	Cinétique « moyenne »	-	-	0,25
Ph_{23bis} : Fissuration du verre trempé	**Déclaration**	Cinétique « rapide »	-	-	0,25
Ph_{24} : Rupture du verre trempé	**Déclaration**	Cinétique « très rapide »	-	-	0,25
Ph_{25} : Abrasion du verre trempé	**Déclaration**	Cinétique « rapide »	-	-	0,25
EMC_{MM} : Ensemble Maximal Cohérent de Masse Maximale.					

Les « données utilisées » citées dans la colonne « mode d'obtention » du tableau ci-dessus correspondent aux données temporelles présentées en annexe 13.

Annexe 16

Données temporelles du mur en béton

Le tableau suivant récapitule les données temporelles collectées et utilisées pour évaluer la durée des scénarii du mur en béton :

N°	Entité géométrique	Entité phénoménologique	Donnée brute	Source
Donnée 1	Mur et voile en béton armé	Eclatement du béton	> 10 ans	[PER, 95]
Donnée 2	Mur en béton brut	Enlèvement des zones en cours de décollement (nez de balcon, appuis de fenêtre, moulures)	De 60 à 80 ans	[PER, 95]
Donnée 3	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 25 mm pour $[CO_2]$ = 0,05 %, HR = 65 % et w/c = 0,55	90 ans	[PAP, 92]
Donnée 4	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 25 mm pour w/c variant de 0,5 et 0,6	35 à 60 ans	[AIK, 02]
Donnée 5	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 25 mm pour HR = 65 % et T°C = 20°C	25 ans	[BAR, 92]
Donnée 6	Béton	Carbonatation du béton armé	> 50 jusqu'à 100 ans	[EDI, 03g]
Donnée 7	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 25 mm pour 30 MPa, HR = 60 %, $\gamma(CO_2)$ = 1 et T°C = 20°C	38 ans	[CAP, 05]
Donnée 8	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 25 mm pour $[CO_2] = 2.10^{-9}$ mol/mm^3	27 ans	[LIA, 05]
Donnée 9	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 5 mm pour $[CO_2]$ = 0,05 %, HR = 65 % et w/c = 0,55	3 ans	[PAP, 92]
Donnée 10	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 5 mm pour w/c variant de 0,5 et 0,6	1 à 2 ans	[AIK, 02]
Donnée 11	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 5 mm pour 30 MPa, HR = 60 %, $\gamma(CO_2)$ = 1 et T°C = 20°C	1 à 2 ans	[CAP, 05]
Donnée 12	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 5 mm pour $[CO_2] = 2.10^{-9}$ mol/mm^3	1 an	[LIA, 05]
Donnée 13	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 40 mm pour $[CO_2]$ = 0,05 %, HR = 65 % et w/c = 0,55	125 ans	[PAP, 92]
Donnée 14	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 40 mm pour w/c variant de 0,5 et 0,6	89 à 153 ans	[AIK, 02]
Donnée 15	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 40 mm pour HR = 65 % et T°C = 20°C	64 ans	[BAR, 92]
Donnée 16	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 40 mm pour 30 MPa, HR = 60 %, $\gamma(CO_2)$ = 1 et T°C = 20°C	98 ans	[CAP, 05]
Donnée 17	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 40 mm pour $[CO_2] = 2.10^{-9}$ mol/mm^3	65 an	[LIA, 05]
Donnée 18	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 20 mm	> 100 jusqu'à 200 ans	[EDI, 03f]
Donnée 19	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 20 mm pour $[CO_2]$ = 0,05 %, HR = 65 % et w/c = 0,55	57 ans	[PAP, 92]

Donnée 20	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 20 mm pour w/c variant de 0,5 et 0,6	22 à 38 ans	[AIK, 02]
Donnée 21	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 20 mm pour 30 MPa, HR = 60 %, $\gamma(CO_2)$ = 1 et T°C = 20°C	25 ans	[CAP, 05]
Donnée 22	Béton	Durée d'atteinte du front de carbonatation à 20 mm pour $[CO_2] = 2.10^{-9}$ mol/mm^3	17 ans	[LIA, 05]
Donnée 23	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 6,1 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, largeur de fissuration (w) = 1 mm, enrobage (e) = 25 mm et vitesse de corrosion (i_{coor}) = 10 à 30 mA/m²	27 à 81 ans	[GUL, 02] [VID, 03]
Donnée 24	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 6,1 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 1 mm, e = 25 mm et i_{coor} = 10 à 20 mA/m²	40 à 81 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [GON, 96]
Donnée 25	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 6,1 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 1 mm, e = 25 mm et i_{coor} = 6,9 mA/m²	118 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [PEP, 94]
Donnée 26	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 6,34 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 1 mm, e = 5 mm et i_{coor} = 10 à 30 mA/m²	24 à 71 ans	[GUL, 02] [VID, 03]
Donnée 27	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 6,34 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 1 mm, e = 5 mm et i_{coor} = 10 à 20 mA/m²	36 à 71 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [GON, 96]
Donnée 28	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 6,34 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 1 mm, e = 5 mm et i_{coor} = 6,9 mA/m²	103 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [PEP, 94]
Donnée 29	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 6,95 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 0,5 mm, e = 25 mm et i_{coor} = 10 à 30 mA/m²	15 à 45 ans	[GUL, 02] [VID, 03]
Donnée 30	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 6,95 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 0,5 mm, e = 25 mm et i_{coor} = 10 à 20 mA/m²	22 à 45 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [GON, 96]
Donnée 31	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 6,95 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 0,5 mm, e = 25 mm et i_{coor} = 6,9 mA/m²	65 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [PEP, 94]
Donnée 32	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 7,15 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 0,5 mm, e = 5 mm et i_{coor} = 10 à 30 mA/m²	12 à 36 ans	[GUL, 02] [VID, 03]
Donnée 33	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 7,15 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 0,5 mm, e = 5 mm et i_{coor} = 10 à 20 mA/m²	18 à 36 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [GON, 96]
Donnée 34	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 7,15 mm, avec $\phi_{initial}$ = 8 mm, w = 0,5 mm, e = 5 mm et i_{coor} = 6,9 mA/m²	52 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [PEP, 94]
Donnée 35	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 10,70 mm, avec $\phi_{initial}$ = 12 mm, w = 1 mm, e = 40 mm et i_{coor} = 10 à 30 mA/m²	19 à 56 ans	[GUL, 02] [VID, 03]
Donnée 36	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 10,70 mm, avec $\phi_{initial}$ = 12 mm, w = 1 mm, e = 40 mm et i_{coor} = 10 à 20 mA/m²	28 à 56 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [GON, 96]
Donnée 37	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 10,70 mm, avec $\phi_{initial}$ = 12 mm, w = 1 mm, e = 40 mm et i_{coor} = 6,9 mA/m²	81 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [PEP, 94]
Donnée 38	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que $\phi_{restant}$ = 10,84 mm, avec $\phi_{initial}$ = 12 mm, w = 1 mm, e = 20 mm et i_{coor} = 10 à 30 mA/m²	17 à 50 ans	[GUL, 02] [VID, 03]

Donnée 39	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que ϕ_{restant} = 10,84 mm, avec ϕ_{initial} = 12 mm, w = 1 mm, e = 20 mm et i_{coor} = 10 à 20 mA/m²	25 à 50 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [GON, 96]
Donnée 40	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que ϕ_{restant} = 10,84 mm, avec ϕ_{initial} = 12 mm, w = 1 mm, e = 20 mm et i_{coor} = 6,9 mA/m²	72 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [PEP, 94]
Donnée 41	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que ϕ_{restant} = 11,21 mm, avec ϕ_{initial} = 12 mm, w = 0,5 mm, e = 40 mm et i_{coor} = 10 à 30 mA/m²	11 à 34 ans	[GUL, 02] [VID, 03]
Donnée 42	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que ϕ_{restant} = 11,21 mm, avec ϕ_{initial} = 12 mm, w = 0,5 mm, e = 40 mm et i_{coor} = 10 à 20 mA/m²	17 à 34 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [GON, 96]
Donnée 43	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que ϕ_{restant} = 11,21 mm, avec ϕ_{initial} = 12 mm, w = 0,5 mm, e = 40 mm et i_{coor} = 6,9 mA/m²	49 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [PEP, 94]
Donnée 44	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que ϕ_{restant} = 11,34 mm, avec ϕ_{initial} = 12 mm, w = 0,5 mm, e = 20 mm et i_{coor} = 10 à 30 mA/m²	9 à 28 ans	[GUL, 02] [VID, 03]
Donnée 45	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que ϕ_{restant} = 11,34 mm, avec ϕ_{initial} = 12 mm, w = 0,5 mm, e = 20 mm et i_{coor} = 10 à 20 mA/m²	14 à 28 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [GON, 96]
Donnée 46	Acier	Temps de corrosion de l'acier, tel que ϕ_{restant} = 11,34 mm, avec ϕ_{initial} = 12 mm, w = 0,5 mm, e = 20 mm et i_{coor} = 6,9 mA/m²	41 ans	[GUL, 02] [VID, 03] [PEP, 94]
Donnée 47	Mur et voile en béton armé	Réfection totale du béton	> 30 ans	[PER, 95]
Donnée 48	Façade en béton	Durée de dévalorisation	80 ans	[PIB, 95]
Donnée 49	Maçonnerie de béton	Durée de vie	80 ans	[TRI, 90]
Donnée 50	Mur extérieur en béton	Durée de vie	De 25 à plus de 100 ans	[EDI, 03b]
Donnée 51	Mur en béton	Durée de vie	> 60 jusqu'à 120 ans	[EDI, 03f]
Donnée 52	Maçonnerie en béton armé	Durée de vie	> 80 ans	[EDI, 03e]
Donnée 53	Mur en béton	Durée de vie	De 100 à 150 ans	[EDI, 03b]
Donnée 54	Mur en béton armé	Durée de vie	100 ans	[EDI, 03a]
Donnée 55	Mur en béton	Durée de vie	De 50 à 100 ans	[EDI, 03h]
Donnée 56	Mur en béton armé	Durée de vie (code des impôts coréen)	55 ans	[EDI, 03b]
Donnée 57	Isolant en polystyrène expansé	Durée de vie	60 ans	[EDI, 03i]
Donnée 58	Isolant en polystyrène	Réfection localisée	10 ans	[PER, 95]
Donnée 59	Doublage en carreaux de plâtre	Remplacement (fissures, crevasses, arraché, écaillé)	30 ans	[PER, 95]
Donnée 60	Doublage en plâtrerie	Durée de vie	De 20 à 25 ans	[PIB, 95]
Donnée 61	Doublage en plâtrerie	Durée de vie	De 20 à 30 ans	[PIB, 95]
Donnée 62	Plaques en plâtre cartonnée	Durée de vie	40 ans à 10 ans près	[PIB, 95]

Les références bibliographiques des sources cités dans le tableau ci-avant sont les suivantes :

[AIK, 02]
AI-KHAYAT H., HAQUE M.N., FATTUHI N.I. Concrete corrosion in arid climate. Materials and Structures, 2002, vol. 35, n° 251, pp. 421-426.

[BAR, 92]
BARON J., OLLIVIER J-P. La durabilité des bétons. Paris : Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992, 453 p.

[CAP, 05]
CAPRA B. Simulations de la durée de propagation du front de carbonatation dans des bétons réalisées par Oxand en 2005.

[EDI, 03a]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Addleson & Rice.

[EDI, 03b]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : 7 DBMC.

[EDI, 03e]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Kürty.

[EDI, 03f]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : 8 DBMC.

[EDI, 03g]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Wypych.

[EDI, 03h]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Cahier du CSTB n°175.

[EDI, 03i]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : G. HED.

[GON, 96]
GONZALEZ J.A., FELIU S., RODRIGUEZ P., RAMIREZ E., ALONSO C., ANDRADE C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when, how and how much steel corrodes. Materials and Structures, 1996, vol. 29, n° 185, pp. 40-46.

[GUL, 02]
GULIKERS J. Critical Review Of Corrosion Deterioration models for reinforced concrete. **In** : 9th Durability of Building Materials and Components, 17-21 mars 2002, Brisbane. Melbourne : CSIRO, 2002.

[LIA, 05]
LIANG M-T., JIN W-L., YANG R-J., HUANG N-M. Predeterminate model of corrosion rate of steel in concrete. Concrete and Research, 2005, vol. 25, pp. 1827-1833.

[PAP, 92]
PAPADAKIS V.G., FARDIS M.N., VAYENAS C.G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. Materials and Structures, 1992, vol. 25, n° 149, pp. 293-304.

[PEP, 94]
PEPENAR I., GRIMALDI G., RAHARINAIVO A. Fluctuation du potentiel des aciers dans le béton et sous protection cathodique. Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1994, 69 p.

[PER, 95]
PERRET J. Guide de la maintenance des bâtiments. Paris : Le Moniteur, 1995, 431 p.

[PIB, 95]
PIBAT. Vieillissement des éléments de construction et coût d'entretien – Données pour l'entretien et la rénovation des immeubles d'habitation. Berne : Office fédéral des questions conjoncturelles, 1995, 110 p.

[TRI, 90]
TRIBU. Evaluation des données disponibles concernant la durabilité des matériaux, composants et équipements en vue de leur utilisation pour des outils de maintenance. PARIS : Techniques Recherches et Innovations pour le Bâtiment et l'Urbain, 100 p.

[VID, 03]
VIDAL T. Evaluation de l'état de corrosion et du comportement mécanique résiduel d'éléments en béton armé : Méthode RESTOR. **In** : INARD C. XXIèmes rencontres universitaires de Génie Civil, 2-3 juin 2003, La Rochelle. La Rochelle : AUGC, 2003, 8p.

Annexe 17

Détails des analyses quantitatives temporelle et de la criticité du mur en briques

I. Analyse quantitative temporelle du mur en briques

I.1 Objectifs

Premier objectif de cette analyse : obtenir la durée de vie du mur en briques.

Second objectif de cette analyse : obtenir les données nécessaires pour mener l'analyse quantitative de la criticité, c'est-à-dire les durées des scénarii du mur en briques et leurs probabilités d'apparition. Ce second objectif ne peut être résolu qu'après résolution du premier objectif.

I.2 Données disponibles et manquantes

Données disponibles :

- 4 durées de vie du mur en briques présentées dans le tableau 100.
- 5 scénarii de dégradations du mur en briques, identifiés lors de son analyse qualitative (*cf.* figure 65 au paragraphe I.1.3 de la partie C) et rappelés dans le tableau 101.

Données non disponibles :

- durées des scénarii du mur en briques,
- probabilités d'apparition des scénarii et des phénomènes du mur en briques.

N°	Entité géométrique	Entité phénoménologique	Donnée brute	Source
Donnée 1	Maçonnerie en briques	Durée de vie	< 150 ans	[EDI, 03e]
Donnée 2	Travaux en briques (mur)	Durée de vie	95 ans	[EDI, 03g]
Donnée 3	Maçonnerie en briques creuses	Durée de vie	> 70 jusqu'à 100 ans	[EDI, 03e]
Donnée 4	Réfection totale d'un mur de briques en doublage	Durée de vie	> 80 ans	[PER, 95]

Tableau 100 : Données temporelles collectées au niveau du produit

Les références bibliographiques des sources cités dans le tableau ci-avant sont les suivantes :

[EDI, 03e]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Kürty.

[EDI, 03g]
EDIFICE. Evaluation de la Durée de vie par Fusion d'Informations Conflictuelles et Equivoques. Version 1.0. Mise à jour de 2003. Source : Wypych.

[PER ; 95]
PERRET J. Guide de la maintenance des bâtiments. Paris : Le Moniteur, 1995, 431 p.

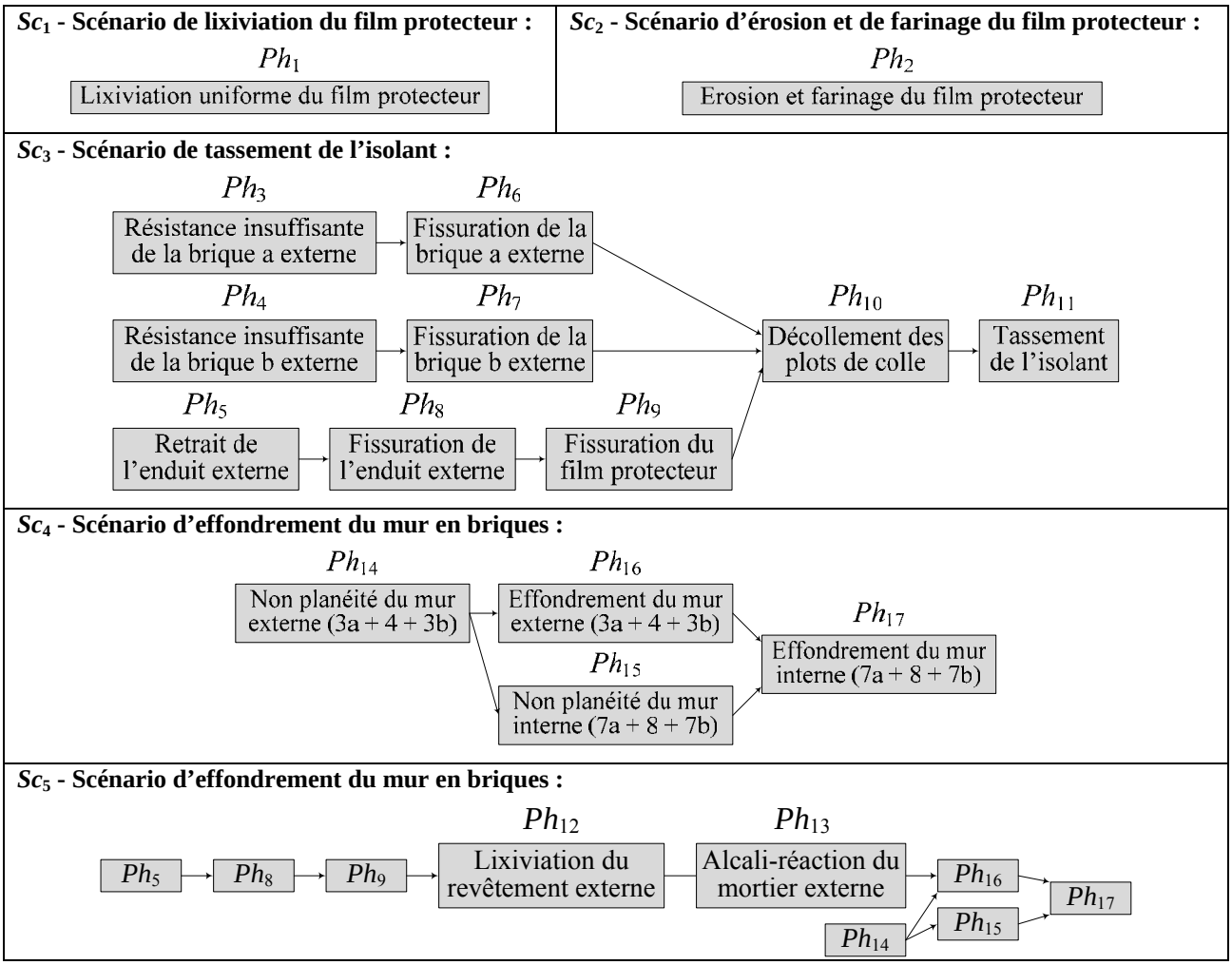


Tableau 101 : Scénarii du mur en briques étudiés

I.3 Réponse au premier objectif

I.3.1 Stratégie adoptée pour répondre à cet objectif

Nous évaluons la qualité des quatre durées du tableau 101, puis les unifions. Le résultat sera alors soit satisfaisant, soit non satisfaisant et nous ne pourrons pas proposer d'alternative dans le cas de données non satisfaisantes (agréger des données à des niveaux inférieurs pour obtenir la durée de vie du mur en briques) puisque nous ne disposons pas de durées à des niveaux inférieurs.

I.3.2 Evaluation du premier objectif

L'évaluation de la qualité, selon la démarche détaillée au I.2.3-c de la partie B et illustrée au I.2.1.1 de la partie C, des quatre données présentées au tableau 100 donne :

- m_c(donnée 1) = 0,58,
- m_c(donnée 2) = 0,54,
- m_c(donnée 3) = 0,52,
- m_c(donnée 4) = 0, 65.

Les grilles d'estimation de la qualité de ces quatre données sont présentées dans le tableau suivant :

	Donnée 1	Donnée 2	Donnée 3	Donnée 4
CE_1	1/3	1/3	1/3	1/3
CE_2	2/3	2/3	2/3	2/3
CE_3	2/3	2/3	2/3	2/3
CE_4	1/3	1/3	1/3	1
CE_5	0	0	0	0
CE_6	2/3	2/3	2/3	2/3
CE_7	1	1	1	1
CE_8	2/3	2/3	1/3	2/3
CE_9	1	1	1	1
CE_{10}	1/3	1/3	1/3	1/3
CE_{14}	1/3	1/3	1/3	2/3
CE_{15}	0,916	0,533	0,61	0,797
Masse de croyance	**0,58**	**0,54**	**0,52**	**0,65**

Tableau 102 : Estimation de la qualité des données du mur en briques

Le conflit résultant de la fusion des quatre données de durée de vie du mur en briques selon la règle dite d'intersection est de 0,137. Ce conflit est faible (< 0,2), mais il y a faible cohérence entre les données résultant de la préparation de ces quatre données, par conséquent nous procédons à une fusion selon la règle dite d'intersection avec faible cohérence. Le résultat de cette fusion est le suivant :

- durée de vie : [85 ; 90] ans (80% du consensus),
- *Bel* ([85 ; 90]) = 0,038 (croyance),
- *P* ([85 ; 90]) = 0,218 (probabilité de Smets),
- *Pl* ([85 ; 90]) = 0,919 (plausibilité).

La probabilité de Smets de cet intervalle de durée de vie est relativement faible et l'écart entre la croyance et la plausibilité est élevé (0,881), cette durée de vie est donc faiblement consensuelle, et ce résultat n'est pas satisfaisant ; cependant nous ne disposons pas de données à des niveaux inférieurs ou supérieurs à celui des scénarii du produit pour pouvoir proposer une alternative.

I.4 Réponse au second objectif

I.4.1 Stratégie adoptée pour répondre à cet objectif

Nous ne disposons pas de durées des scénarii, par contre nous sommes en mesure d'estimer a priori les cinétiques des phénomènes composant ces scénarii. La démarche proposée en partie B (pour l'estimation de la probabilité d'apparition d'un phénomène) consiste à déduire la cinétique d'un phénomène à partir de sa durée à l'aide d'une grille d'estimation (*cf.* tableau 25 de la partie B) qui dépend de la borne supérieure de la période d'observation (égale généralement à la durée du scénario le plus long). Par conséquent, nous estimons ici la durée des phénomènes puis celles des scénarii (par agrégation des durées des phénomènes) en menant la démarche inverse, c'est-à-dire :

- établissement de la grille d'évaluation en considérant la borne supérieure de la période d'observation égale à la moyenne de l'intervalle de la durée de vie du mur en briques obtenu précédemment (premier objectif de cette analyse quantitative temporelle),
- déclaration a priori des cinétiques des phénomènes du mur en briques,

- déduction de la durée des phénomènes à partir de la grille d'estimation établie précédemment,
- agrégation des durées des phénomènes pour obtenir les durées des scénarii.

En ce qui concerne les probabilités d'apparition des phénomènes, nous estimons les probabilités d'apparition des phénomènes selon la démarche illustrée à partir de l'exemple de la fenêtre (*cf.* I.2.1.3 de la partie C) puis agrégons ces probabilités pour obtenir les probabilités d'apparition des scénarii.

I.4.2 Evaluation du second objectif

La table d'estimation de l'indicateur de cinétique de dégradation des phénomènes du mur en briques établie à partir de la moyenne de son intervalle de durées de vie, c'est-à-dire 87,5 ans, est la suivante :

Cinétique	Valeur de la classe
Très rapide	[0 ; 5]
Rapide	[4 ; 14]
Moyenne	[13 ; 31]
Lente	[30 ; 53]
Très lente	[52 ; 87,5]

Tableau 103 : Table d'estimation de l'indicateur de cinétique de dégradation des phénomènes du mur en briques (déduite de la durée de vie du mur en briques obtenue pour le premier objectif)

Les déclarations a priori que nous faisons des cinétiques des phénomènes du mur en briques, les durées résultant du tableau ci-dessus et les masses de croyances associées à ces durées que nous déclarons (puisque les cinétiques sont déclarées) sont présentées dans le tableau suivant :

	Cinétique	Durée	Masse de croyance
Ph_1	Rapide	[4 ; 14] ans	0,25
Ph_2	Rapide	[4 ; 14] ans	0,25
Ph_3	Instantanée	-	0,25
Ph_4	Instantanée	-	0,25
Ph_5	Instantanée	-	0,25
Ph_6	Rapide	[4 ; 14] ans	0,25
Ph_7	Rapide	[4 ; 14] ans	0,25
Ph_8	Instantanée	-	0,25
Ph_9	Très rapide	[0 ; 5] ans	0,25

	Cinétique	Durée	Masse de croyance
Ph_{10}	Moyenne	[13 ; 31] ans	0,25
Ph_{11}	Rapide	[4 ; 14] ans	0,25
Ph_{12}	Moyenne	[13 ; 31] ans	0,25
Ph_{13}	Lente	[30 ; 53] ans	0,25
Ph_{14}	Instantanée	-	0,25
Ph_{15}	Instantanée	-	0,25
Ph_{16}	Très rapide	[0 ; 5] ans	0,25
Ph_{17}	Très rapide	[0 ; 5] ans	0,25

Tableau 104 : Cinétiques (déclarées), durées (déduites des cinétiques) des phénomènes et masses de croyances (déclarées) associées aux durées du mur en briques

Les durées des scénarii du mur en briques obtenues par agrégation des durées des phénomènes constitutifs, sont regroupées dans le tableau 105. Les masses de croyance associées à ces scénarii sont égales à 0,25 étant donné que les masses associées aux phénomènes sont toutes égales à 0,25.

	Durée
Sc_1	[4 ; 14] ans

	Durée
Sc_2	[4 ; 14] ans

	Durée
Sc_3	[21 ; 59] ans

	Durée
Sc_4	[0 ; 10] ans

	Durée
Sc_5	[43 ; 99] ans

Tableau 105 : Durées des scénarii du mur en briques (obtenues par agrégation des durées des phénomènes)

Les résultats des estimations que nous proposons permettant d'aboutir aux probabilités d'apparition des scénarii du mur en briques sont :

- l'estimation de l'indicateur d'environnement des phénomènes $I\xi_i^{D1}$ du mur en briques, détaillée au tableau 106,
- l'estimation de l'indicateur de conception des phénomènes $I\xi_i^{D2}$ du mur en briques, présentée au tableau 107,
- la déduction de l'indicateur de démarrage des phénomènes $I\xi_i^{D} = f\left(I\xi_i^{D1} ; I\xi_i^{D2}\right)$ du mur en briques, synthétisée au tableau 108,
- l'estimation de l'indicateur de cinétique des phénomènes $I\xi_i^{C}$ du mur en briques, regroupée au tableau 104,
- la déduction de la probabilité d'apparition des phénomènes ξ_i du mur en briques, résumée au tableau 109,
- le calcul de la probabilité d'apparition des scénarii $\xi^j = f(\xi_i)$, fourni au tableau 110.

	$I\xi_i^{D1}$
Ph_1	Moyen
Ph_2	Moyen
Ph_3	Moyen
Ph_4	Moyen
Ph_5	Très important

	$I\xi_i^{D1}$
Ph_6	Important
Ph_7	Important
Ph_8	Important
Ph_9	Important
Ph_{10}	Important

	$I\xi_i^{D1}$
Ph_{11}	Important
Ph_{12}	Important
Ph_{13}	Important
Ph_{14}	Moyen
Ph_{15}	Moyen

	$I\xi_i^{D1}$
Ph_{16}	Très important
Ph_{17}	Très important

Tableau 106 : Indicateur d'environnement des phénomènes du mur en briques

Ph_i	$I\xi_i^{D2-1}$	$I\xi_i^{D2-2}$	$I\xi_i^{D2-3}$	$I\xi_i^{D2-4}$	$I\xi_i^{D2}$
Ph_1	C	B	D	A	D
Ph_2	C	B	D	A	D
Ph_3	B	B	A	A	B
Ph_4	B	B	A	A	B
Ph_5	A	A	D	A	D
Ph_6	B	B	A	A	B
Ph_7	B	B	A	A	B
Ph_8	A	A	D	A	D
Ph_9	C	B	D	A	D

Ph_i	$I\xi_i^{D2-1}$	$I\xi_i^{D2-2}$	$I\xi_i^{D2-3}$	$I\xi_i^{D2-4}$	$I\xi_i^{D2}$
Ph_{10}	A	A	D	A	D
Ph_{11}	B	B	B	A	B
Ph_{12}	A	A	D	A	D
Ph_{13}	A	B	D	A	D
Ph_{14}	B	B	B	A	B
Ph_{15}	B	B	B	A	B
Ph_{16}	B	B	B	A	B
Ph_{17}	B	B	B	A	B

Tableau 107 : Indicateur de conception des phénomènes du mur en briques

Rappel : $I\xi_i^{D2-1}$ est le sous-critère de complexité structurelle du composant associé au Ph_i, $I\xi_i^{D2-2}$ est sous-critère de complexité fonctionnelle du composant associé au Ph_i, $I\xi_i^{D2-3}$ est le sous-critère de phase de réalisation du composant lié au Ph_i et $I\xi_i^{D2-4}$ est le sous-critère de cohérence du composant vis-à-vis du lieu d'implantation du produit.

	$I\xi_i^{D}$
Ph_1	C
Ph_2	C
Ph_3	B
Ph_4	B

	$I\xi_i^{D}$
Ph_5	D
Ph_6	C
Ph_7	C
Ph_8	D

	$I\xi_i^{D}$
Ph_9	D
Ph_{10}	D
Ph_{11}	C
Ph_{12}	D

	$I\xi_i^{D}$
Ph_{13}	D
Ph_{14}	B
Ph_{15}	B
Ph_{16}	C

	$I\xi_i^{D}$
Ph_{17}	C

Tableau 108 : Indicateur de démarrage des phénomènes du mur en briques

	ξ_i
Ph_1	0,7
Ph_2	0,7
Ph_3	0,7

	ξ_i
Ph_4	0,7
Ph_5	1
Ph_6	0,7

	ξ_i
Ph_7	0,7
Ph_8	1
Ph_9	1

	ξ_i
Ph_{10}	0,7
Ph_{11}	0,7
Ph_{12}	0,7

	ξ_i
Ph_{13}	0,55
Ph_{14}	0,7
Ph_{15}	0,7

	ξ_i
Ph_{16}	0,85
Ph_{17}	0,85

Tableau 109 : Probabilité d'apparition des phénomènes du mur en briques

	ξ^j
Sc_1	0,700

	ξ^j
Sc_2	0,700

	ξ^j
Sc_3	0,118

	ξ^j
Sc_4	0,354

	ξ^j
Sc_5	0,136

Tableau 110 : Probabilité d'apparition des scénarii du mur en briques

Nous disposons à ce niveau des résultats (durée de vie et probabilité d'apparition des scénarii ainsi que la masse de croyance associée à la durée de vie) utiles pour mener l'analyse quantitative de la criticité du mur en briques. Ils sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Du^j	$m(Du^j)$	ξ^j
Sc_1	[4 ; 14] ans	0,250	0,700
Sc_2	[4 ; 14] ans	0,250	0,700
Sc_3	[21 ; 59] ans	0,250	0,118

	Du^j	$m(Du^j)$	ξ^j
Sc_4	[0 ; 10] ans	0,250	0,354
Sc_5	[43 ; 99] ans	0,250	0,136

Tableau 111 : Synthèse des résultats de l'analyse quantitative temporelle du mur en briques

II. Analyse quantitative de la criticité du mur en briques

La démarche d'analyse quantitative de la criticité du mur en briques est identique à celle du mur en béton, détaillée au I.3.1 de la partie C ; nous ne présenterons donc ici que les résultats :

- du classement des fonctions du mur en briques – *cf.* tableau 112,
- de l'évaluation du degré de participation des composants aux fonctions – *cf.* tableau 113,
- de l'évaluation de l'impact des phénomènes sur les fonctions du mur en briques – *cf.* tableau 114,
- de l'évaluation de l'impact des phénomènes sur la robustesse du mur en briques – $I_{RP}Ph_i$ – *cf.* tableau 115,
- de l'évaluation de l'impact des scénarii sur la robustesse du mur en briques – $I_{RP}Sc_j$ – *cf.* tableau 116,
- de l'évaluation de l'impact des scénarii sur la maintenabilité du mur en briques – $I_{MP}Sc_j$ – *cf.* tableau 117,
- de l'évaluation de l'impact des scénarii sur la robustesse du bâtiment – $I_{RO}Sc_j$ – *cf.* tableau 118,
- de l'évaluation de l'impact des scénarii sur maintenabilité du bâtiment – $I_{MO}Sc_j$ – *cf.* tableau 119,
- de l'évaluation de la gravité des scénarii – G^j – *cf.* tableau 120,
- de l'évaluation du critère de durée – Cdr^j – , des pondérations des critères de criticité – $p\xi^j$, $pCdr^j$, pG^j – et de la criticité des scénarii – Cr^j – *cf.* tableau 121.

	Désignation	Classement
Fp_1	Stopper	Essentielle
Fp_2	Absorber	Essentielle
Fp_3	Résister mécaniquement	Essentielle
Fs_4	Etre intègre	Très importante
Fp_5	Etre conforme	Essentielle

Tableau 112 : Classement des fonctions du mur en briques

Nous classons ici la fonction « stopper » en « essentielle » alors que nous l'avions classer en « très importante » pour l'application du mur en béton, puisque « stopper » est ici le rôle du film protecteur.

	Film protecteur	Enduit externe	Briques externes	Mortier externe	Plots de colle	Isolant	Briques internes	Mortier interne	Enduit interne
Fp_1	Elevé								Elevé
Fp_2	Faible	Faible	Elevé	Elevé	Faible	Elevé	Elevé	Elevé	Faible
Fp_3	Faible	Faible	Elevé	Elevé	Elevé	Faible	Elevé	Elevé	Faible
Fs_4	Elevé	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Elevé
Fp_5	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé

Tableau 113 : Degré de participation des composants aux fonctions du mur en briques

Phénomène	Fonction	Impact
Lixiviation uniforme du film protecteur	Résister mécaniquement	Faible
	Etre intègre	Moyen
	Etre conforme	Fort
Erosion et farinage du film protecteur	Résister mécaniquement	Fort
	Etre intègre	Moyen
	Etre conforme	Fort
Résistance insuffisante des briques externes	Résister mécaniquement	Fort
	Etre conforme	Fort
Retrait de l'enduit externe	Résister mécaniquement	Moyen
	Etre intègre	Moyen
	Etre conforme	Fort
Fissuration des briques externes, de l'enduit et du film protecteur	Résister mécaniquement	Fort
Fissuration du film protecteur	Etre conforme	Fort
Décollement des plots de colle	Résister mécaniquement	Fort

Phénomène	Fonction	Impact
Tassement de l'isolant	Absorber	Fort
	Résister mécaniquement	Moyen
Lixiviation (sels) de l'enduit externe	Résister mécaniquement	Moyen
	Etre intègre	Moyen
Alcali réaction du mortier interne	Absorber	Faible
	Résister mécaniquement	Moyen
Non planéité verticale des façades en briques	Résister mécaniquement	Moyen
	Etre conforme	Fort
Effondrement des façades en briques	Stopper	Fort
	Absorber	Fort
	Résister mécaniquement	Fort
	Etre intègre	Moyen
	Etre conforme	Fort

Tableau 114 : Impact des phénomènes sur les fonctions du mur en briques

		Impact par fonction	$I_{RP}Ph_i$
Ph_1	Fp_3	0,6	0,78
	Fs_4	0,75	
	Fp_5	1	
Ph_2	Fp_3	0,8	0,85
	Fs_4	0,75	
	Fp_5	1	
Ph_3, Ph_4	Fp_3	1	1
	Fp_5	1	
Ph_5	Fp_3	0,7	0,75
	Fs_4	0,55	
	Fp_5	1	
Ph_6, Ph_7	Fp_3	1	1
Ph_8	Fp_3	0,8	0,8
Ph_9	Fp_3	0,8	0,9
	Fp_5	1	

		Impact par fonction	$I_{RP}Ph_i$
Ph_{10}	Fp_3	1	1
Ph_{11}	Fp_2	1	0,85
	Fp_3	0,7	
Ph_{12}	Fp_3	0,7	0,63
	Fs_4	0,55	
Ph_{13}	Fp_2	0,8	0,85
	Fp_3	0,9	
Ph_{14}, Ph_{15}	Fp_3	0,9	0,95
	Fp_5	1	
Ph_{16}, Ph_{17}	Fp_1	1	0,91
	Fp_2	1	
	Fp_3	1	
	Fs_4	0,55	
	Fp_5	1	

Tableau 115 : Impact des phénomènes sur la robustesse du mur en briques

	$I_{RP}Sc_j$
Sc_1	0,78

	$I_{RP}Sc_j$
Sc_2	0,85

	$I_{RP}Sc_j$
Sc_3	0,92

	$I_{RP}Sc_j$
Sc_4	0,93

	$I_{RP}Sc_j$
Sc_5	0,85

Tableau 116 : Impact des scénarii sur la robustesse du mur en briques

	« Détectabilité »	« Accessibilité »	« Dissociabilité »	« Coûts »	$I_{MP}Sc_j$
Sc_1 et Sc_2	0	1/3	2/3	2/3	0,417
Sc_3	1	1	1	1	1,000
Sc_4 et Sc_5	0	2/3	1	1	0,667

Tableau 117 : Impact des scénarii sur la maintenabilité du mur en briques

	Ampleur	Nature	$I_{RO}Sc_j$
Sc_1 et Sc_2	2/3	1/3	0,500
Sc_3	2/3	2/3	0,667
Sc_4 et Sc_5	2/3	1	0,833

Tableau 118 : Impact des scénarii sur la robustesse du bâtiment

	Dissociabilité	Coûts	$I_{MO}Sc_j$
Sc_1 et Sc_2	2/3	2/3	0,500
Sc_3, Sc_4 et Sc_5	1	1	1,000

Tableau 119 : Impact des scénarii sur la maintenabilité du bâtiment

	G^j
Sc_1	0,590

	G^j
Sc_2	0,610

	G^j
Sc_3	0,900

	G^j
Sc_4	0,860

	G^j
Sc_5	0,840

Tableau 120 : Gravité des scénarii du mur en briques

	$p\xi^j$	Cdr^j	$pCdr^j$	pG^j	Cr^j
Sc_1	0,286	0,900	0,429	0,286	0,742
Sc_2	0,286	0,900	0,429	0,286	0,750
Sc_3	0,286	0,556	0,429	0,286	0,410
Sc_4	0,286	0,944	0,429	0,286	0,695
Sc_5	0,286	0,211	0,429	0,286	0,276

Tableau 121 : Critère de durée, pondérations des critères de criticité et criticité des scénarii du mur en briques

Annexe 18

Fonctions des niveaux de performances du mur en briques

Les fonctions reliant les niveaux de performances des fonctions aux états de dégradation des phénomènes du mur en briques sont regroupées dans le tableau suivant.

Remarque : ces fonctions ont été déclarées et non validées.

Fp_1 : Stopper Ph_{16} : Effondrement du mur externe	$\mu_{16}^{1} = 1 - \eta_{16}$
Fp_1 : Stopper Ph_{17} : Effondrement du mur interne	$\mu_{17}^{1} = 1 - \eta_{17}$
Fp_2 : Absorber Ph_{11} : Tassement de l'isolant	$\mu_{11}^{2} = 1 - 0{,}5 \times \eta_{11}$
Fp_2 : Absorber Ph_{16} : Effondrement du mur externe	$\mu_{16}^{2} = 1 - \eta_{16}$
Fp_2 : Absorber Ph_{17} : Effondrement du mur interne	$\mu_{17}^{2} = 1 - \eta_{17}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_1 : Lixiviation uniforme du film protecteur	$\mu_{1}^{3} = 1 - 0{,}01 \times \eta_{1}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_2 : Erosion et farinage du film protecteur	$\mu_{2}^{3} = 1 - 0{,}02 \times \eta_{2}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_3 : Résistance insuffisante de la brique a externe	$\mu_{3}^{3} = 1 - 0{,}2 \times \eta_{3}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_4 : Résistance insuffisante de la brique b externe	$\mu_{4}^{3} = 1 - 0{,}2 \times \eta_{4}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_5 : Retrait de l'enduit externe	$\mu_{5}^{3} = 1 - 0{,}02 \times \eta_{5}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_6 : Fissuration de la brique a externe	$\mu_{6}^{3} = 1 - 0{,}1 \times \eta_{6}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_7 : Fissuration de la brique b externe	$\mu_{7}^{3} = 1 - 0{,}1 \times \eta_{7}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_8 : Fissuration de l'enduit externe	$\mu_{8}^{3} = 1 - 0{,}02 \times \eta_{8}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_9 : Fissuration du film protecteur	$\mu_{9}^{3} = 1 - 0{,}02 \times \eta_{9}$

Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{16} : Effondrement du mur externe	$\mu_{16}^{3} = 1 - \eta_{16}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{17} : Effondrement du mur interne	$\mu_{17}^{3} = 1 - \eta_{17}$
Fs_4 : Etre intègre Ph_1 : Lixiviation uniforme du film protecteur	$\mu_{1}^{4} = 1 - \eta_{1}$
Fs_4 : Etre intègre Ph_2 : Erosion et farinage du film protecteur	$\mu_{2}^{4} = 1 - \eta_{2}$
Fs_4 : Etre intègre Ph_5 : Retrait de l'enduit externe	$\mu_{5}^{4} = 1 - \eta_{5}$
Fs_4 : Etre intègre Ph_{16} : Lixiviation uniforme du film protecteur	$\mu_{16}^{4} = 1 - \eta_{16}$
Fs_4 : Etre intègre Ph_{17} : Effondrement du mur interne	$\mu_{17}^{4} = 1 - \eta_{17}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{10} : Décollement des plots de colle	$\mu_{10}^{3} = 1 - 0{,}1 \times \eta_{10}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{11} : Tassement de l'isolant	$\mu_{11}^{3} = 1 - 0{,}2 \times \eta_{11}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{14} : Non planéité du mur externe	$\mu_{14}^{3} = 1 - 0{,}1 \times \eta_{14}$
Fp_3 : Résister mécaniquement Ph_{15} : Non planéité du mur interne	$\mu_{15}^{3} = 1 - 0{,}1 \times \eta_{15}$
Fp_5 : Etre conforme Ph_{15} : Non planéité du mur interne	$\mu_{15}^{5} = 1 - 0{,}3 \times \eta_{15}$
Fp_5 : Etre conforme Ph_{16} : Effondrement du mur externe	$\mu_{16}^{5} = 1 - \eta_{16}$
Fp_5 : Etre conforme Ph_{17} : Effondrement du mur interne	$\mu_{17}^{5} = 1 - \eta_{17}$

Fp_5 : Etre conforme Ph_1 : Lixiviation uniforme du film protecteur	$\mu_1^5 = 1 - 0{,}5 \times \eta_1$
Fp_5 : Etre conforme Ph_2 : Erosion et farinage du film protecteur	$\mu_2^5 = 1 - 0{,}5 \times \eta_2$
Fp_5 : Etre conforme Ph_3 : Résistance insuffisante de la brique a externe	$\mu_3^5 = 1 - 0{,}3 \times \eta_3$
Fp_5 : Etre conforme Ph_4 : Résistance insuffisante de la brique b externe	$\mu_4^5 = 1 - 0{,}3 \times \eta_4$

Fp_5 : Etre conforme Ph_5 : Retrait de l'enduit externe	$\mu_5^5 = 1 - 0{,}1 \times \eta_5$
Fp_5 : Etre conforme Ph_9 : Fissuration du film protecteur	$\mu_9^5 = 1 - 0{,}2 \times \eta_9$
Fp_5 : Etre conforme Ph_{14} : Non planéité du mur externe	$\mu_{14}^5 = 1 - 0{,}3 \times \eta_{14}$

Tableau 122 : Fonctions des niveaux de performance des couples {fonction ; phénomène} du mur en briques

Évaluation des scénarii de dégradation des produits de construction

Résumé

Ce mémoire de thèse présente une méthodologie d'évaluation des profils multi-performances des produits de construction à des dates fixées de leurs vies en œuvre, exploitant l'ensemble des données disponibles (durées, probabilités et niveaux de performances), multi-sources et multi-échelles (géométrique, phénoménologique, fonctionnelle et temporelle).
Cette méthodologie comprend quatre étapes :

- **analyse qualitative** : recherche des scénarii de dégradations,
- **analyse quantitative temporelle** : évaluation des durées et des probabilités d'apparition des scénarii et gestion de leurs interactions,
- **analyse quantitative de la criticité** : hiérarchisation des scénarii,
- **analyse quantitative des performances** : obtention des profils multi-performances.

Elle englobe des méthodes, des bases de données et des outils de représentation, applicables indépendamment les uns des autres. Elle est illustrée sur une fenêtre fixe, des murs en béton et en briques et un complexe mur en béton et fenêtre.

Mots clefs

Approche multi-échelle, bâtiment, criticité, durée de vie, probabilité d'apparition, profil multi-performance, scénarii de dégradation, unification des données.

The Evaluation of Degradation Scenarios of Building Components

Abstract

This Ph.D. thesis presents a methodology for evaluating the multi-attribute performance profiles of building components, taking into account the entire set of possible sources of information which relate to geometric, phenomenological, functional and temporal aspects.
The methodology comprises four steps :

- **Qualitative analysis**: a review of the possible degradation scenarios is completed;
- **Quantitative analysis applied temporally**: the duration and the probability of occurrence of the scenarios are evaluated and the interrelations between scenarios are managed;
- **Quantitative analysis of criticality**: a means to order the scenarios;
- **Quantitative analysis of performance**: a means to obtain multi-attribute performance profiles.

The methodology encompasses methods, databases and representation tools that can be independently applied. It is applied to the evaluation of a fixed window, a concrete wall, a brick wall and a combined system comprised of a concrete wall incorporating a fixed window.

Key Words

Building, criticality, degradation scenarios, multi-attribute performance profile, multi-scale approach, probability of occurrence, service life, unification of data.