

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou



Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Civil

THÈSE

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
DOCTORAT**

Domaine : Science et Technique. Filière : Génie Civil
Spécialité : Calcul avancé des structures de Génie Civil.

Thème

***Développement d'un système Expert pour la réhabilitation des
structures endommagées par des séismes.***

Présentée par
AKKOUICHE Karim

Devant le jury composé de :

M. HAMMOUM Hocine	Professeur	Univ. de Tizi-Ouzou	Président
M. HANACHI Naceur-Eddine	Professeur	Univ. de Tizi-Ouzou	Rapporteur
M. HAMIZI Mohand	Professeur	Univ. de Tizi-Ouzou	Co-Rapporteur
M. MEBARKI Ahmed	Professeur	Univ. Marne la Vallée	Examineur
M.ABED Mohamed	Professeur	Univ. de Blida	Examineur
M.ABED Ahmed	Professeur	Univ. de Tizi-Ouzou	Examineur
M. DAOUI Mohammed	Professeur	Univ. de Tizi-Ouzou	Invité

Remerciements

Je tiens à remercier les Professeurs HANNACHI Naceur-Eddine et HAMIZI Mohand de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou pour l'accueil qu'ils m'ont réservé au sein du laboratoire «LaMOMS». Aussi, je les remercie pour avoir dirigé cette étude et m'avoir fait partager leurs savoir faire, leurs rigueur scientifique, leurs multiples compétences, ainsi que pour la confiance qu'ils m'ont accordé pendant ces quatre années. Qu'ils soient assurés de toute ma gratitude et de ma reconnaissance.

Aux responsables du CGS (centre national appliqué en génie parasismique) : Monsieur BELAZOUGUI, Monsieur FARSI et Monsieur BOUKRI. Aux personnels techniques du CTC de Tizi-Ouzou et de Boumerdes, à Monsieur DAOUI Mohammed Professeur au département informatique de l'UMMTO et à Monsieur DJOUZI Khereddin doctorant à l'école militaire de Bordj El-bahri. Qu'il me soit permis de les remercier pour les précieux conseils qu'ils m'ont donnés, et qui ont contribué au bon déroulement de ce travail.

Merci aux Professeurs, HAMMOUM Hocine de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, MEBARKI Ahmed de l'Université de Paris Est - Marne la vallée, ABED Mohamed de l'Université Saad Dahlib de Blida et ABED Ahmed de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté d'être membres du jury et de juger ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

J'étends ces remerciements à l'ensemble des membres de l'équipe de recherche en particulier ; M. BOUKAIS Said, Mme BOUZID Leyla, M. KHELIL Nacim, M. NEKMOUCHE Aghiles, M. KAHIL Amar, Melle MILOUDI Nacima, M. KEZMANE Ali et Mme IDRES Lamia pour l'entraide dont ils ont toujours fait preuve et l'ambiance amicale qu'ils ont su faire régner au LAMOMS et ailleurs. Chacun a toujours mis en avant ses compétences et son enthousiasme pour contribuer de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Enfin, je tiens tout particulièrement à remercier ma famille «mon père, ma mère, mes frères, ma faïencé, mon grand père, ma grand-mère, ... etc.» et mes amis «Houcin Zibouche, Rachid Bensaada, Sarah Idressou, Hocine Tebiche, ... etc.» et tous ceux qui voudront bien se reconnaître ici, pour leurs constants encouragements, leurs conseils pratiques, les discussions fructueuses et pour tout ce qui a permis de mener à terme cette étude.

Résumé

L'évaluation rapide et rigoureuse des dommages subis par un ouvrage après un tremblement de terre est une tâche très importante, surtout que l'utilisation des maisons immédiatement après séisme est un fait très fréquent chez les habitants. En se basant sur l'expérience locale (Algérie) faisant suite à différents tremblements de terre successifs, on constate que le nombre d'experts (habilités à effectuer une évaluation de l'état d'un ouvrage) est très insuffisant. Cette situation oblige souvent les pouvoirs publics à faire appel à un personnel n'ayant pas toute la maîtrise de ce processus d'évaluation. À cet effet, et dans un souci de rigueur et d'efficacité, les initiatives se multiplient en Algérie visant la réalisation d'outils sophistiqués et rapides, d'évaluation de l'état des ouvrages après séisme.

Dans cette optique, le travail de recherche effectué consiste en l'élaboration d'un système expert multifonctionnel *EDPS* (Évaluation de Dommages Post-Sismique). Un outil puissant permettant l'évaluation, le traitement et l'archivage du stock de données collectées après tremblement de terre.

On peut noter que cet outil *EDPS* peut être exploité par deux types d'utilisation :

- L'utilisateur ordinaire (le propriétaire ou l'expert), pour l'inspection visuelle des dommages (suivant deux démarches distinctes).
- L'utilisateur administrateur, pour l'actualisation de la base de connaissances et/ou pour l'ajout ou la suppression d'utilisateur de type expert.

L'outil *EDPS* est essentiellement organisé en quatre modules : Interface, aide, explication et acquisition de connaissances.

La connaissance, élément prépondérant dans le système à base de connaissances, se partage en faits et règles.

Parmi ces dernières, on distingue celles dites d'inférences, et d'autres heuristiques données sous formes de modèles mathématiques et de conditions, respectivement.

Parmi les modèles mathématiques nécessaires dans la base de règle, trois sont développés et y sont introduits. Ils permettent d'estimer le niveau de dommage (local et global) c.-à-d. d'estimer l'importance des dégâts occasionnés à l'ensemble des composants structurels, non-structurels et de toute la structure. Lors de l'élaboration de ces modèles, un traitement statistique est appliqué sur une banque de données acquise de l'enquête effectuée après le séisme de Boumerdes en 2003. L'analyse est menée suivant les principes de la théorie des plans d'expériences.

Concernant la base de fait, sa mise en place a été effectuée selon les informations données ci-après :

- Celles issues des rapports d'enquêtes et des articles scientifiques sur l'évaluation des dommages post-sismiques,
- Celles acquises par le biais de retour d'expériences, par questionnaires d'expert/d'ingénieurs,

Enfin, la validation de l'outil et de ses performances est effectuée à travers un test d'évaluation réalisé avec *EDPS* et mené via l'interface expert et propriétaire.

Mots clés : Gestion de crise, Évaluation de dommages, bâti Algérien, Post-sismique, méthode des plans d'expérience, Système Expert.

Abstract

The rapid and rigorous assessment of damage to a structure after an earthquake is a very important task, especially that the use of houses immediately after earthquake is a fact very common among residents. Based on the local experience (Algeria) following successive earthquakes, the number of experts (who are able to carry out an assessment of the condition of a structure) is very inadequate. This situation often forces the public authorities to call on staff who are not fully familiar with this evaluation process. To this end, and for the sake of rigor and efficiency, initiatives are multiplying in Algeria aiming at the realization of sophisticated and fast tools, assessment of the state of constructions after earthquake.

In this context, the research work carried out consists of the development of a multifunctional expert system *EDPS* (Évaluation de Dommages Post-Sismique). A powerful tool for evaluating, processing and archiving the stock of data collected after the earthquake.

It can be noted that this *EDPS* tool can be exploited by two types of use:

- The ordinary user (owner or expert), for visual inspection of damage (following two separate approaches).
- The administrator user, for updating the knowledge base and / or for adding or removing an expert user.

The *EDPS* tool is essentially organized in four modules: Interface, help, explanation and knowledge acquisition.

Knowledge, a preponderant element in the knowledge-based system, is divided into facts and rules.

Among the latter, we distinguish those called inferences, and other heuristics given in the form of mathematical models and conditions, respectively.

Of the mathematical models needed in the rule base, three are developed and introduced. They allow to estimate the level of damage (local and global) i.e. to estimate the damage level to all structural, non-structural and structural components. During the development of these models, a statistical treatment is applied to a data bank acquired from the survey carried out after the Boumerdes earthquake in 2003. The analysis is conducted according to the principles of the theory of experimental design.

Regarding the fact base, its implementation was carried out according to the information given below:

- Those from survey reports and scientific articles on the evaluation of post-seismic damage,
- Those acquired through experience feedback, expert questionnaires / engineers,

Finally, the validation of the tool and its performance is carried out through an evaluation test carried out with *EDPS* and conducted via the expert and proprietary interface.

Key-words: Crisis management, Assessment damage, Algeria builds, Post-earthquake, Experimental of design, Expert system.

Sommaire

Chapitre I : Introduction Générale.	Page
I.1. Introduction.....	-2-
I.2. Problématique	-5-
I.3. Objectifs de la thèse	-6-
I.4. Méthodologie d'approche	-6-
I.5. Plan de la thèse.....	-7-
 Chapitre II : État de l'art sur l'évaluation des dommages post-sismiques.	
II.1. Introduction.....	- 10 -
Partie A : Quelques notions sur les séismes.	- 10 -
II.2. Les séismes	- 10 -
II.3. Historique de la sismicité Algérienne	- 10 -
II.3.1. Les séismes ayant marqué la sismicité de l'Algérie	- 11 -
II.3.1.1. Séisme d'El Asnam du 10 Octobre 1980	- 11 -
- Conséquences du séisme d'El Asnam.....	- 11 -
II.3.1.2. Séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003	- 11 -
- Conséquences du séisme de Boumerdes	- 11 -
II.4. Les effets des séismes	- 12 -
II.4.1. Effets indirects	- 12 -
a- Les tassements.....	- 12 -
b-La liquéfaction	- 12 -
c- Les mouvements de terrain.....	- 13 -
d- Les effets de résonances.....	- 14 -
e- Récapitulatif sur les effets des séismes	- 14 -
II.4.2. Les effets directs	- 15 -
II.4.2.1. Dommages constatés sur les éléments structuraux	- 15 -
a- Dommages constatés sur l'élément poteau.....	- 15 -
b- Dommages sur l'élément poutre	- 15 -
c- Dommages au voisinage du nœud.....	- 16 -
d- Dommages sur le composant voile	- 17 -
II.4.2.2. Dommages constatés sur les éléments non-structuraux.....	- 17 -
a- Dommages sur l'élément murs en maçonnerie	- 17 -
b- Dommage constaté sur l'élément escalier	- 18 -
c- Dommage constaté sur l'élément balcon.....	- 18 -
II.5. Méthodes d'inspection des dommages.	- 19 -
II.5.1. Premier outil : Fiche d'évaluation des dommages.....	- 19 -
II.5.1.1. Fiche d'inspection italienne – fiche AeDES	- 19 -
II.5.1.2. Fiche d'inspection des USA	- 20 -
II.5.1.3. Fiche d'inspection Grec	- 20 -
II.5.1.4. Fiche d'inspection Turquie	- 21 -
II.5.1.5. Fiche d'inspection Japonaise	- 22 -
II.5.1.6. Fiche d'évaluation utilisée en Algérie	- 22 -
II.5.1.7. Avantages et inconvénients de la première méthode d'inspection	- 25 -
a- Avantages	- 25 -
b- Inconvénients	- 25 -
II.5.2. Deuxième méthode : Imagerie satellitaire	- 26 -
II.5.2.1. Utilisation de l'imagerie satellitaire dans le cas du bâti Algérien.....	- 27 -
II.5.2.2. Avantages et inconvénients de l'imagerie satellitaire.....	- 32 -
a- Avantages de l'IS	- 32 -
b- Inconvénients de l'IS	- 33 -
Partie B : Travaux réalisés sur les méthodes d'inspection des dommages post-sismiques.	- 33 -
II.6. Conclusions.....	- 36 -

Chapitre III : Méthode des Plans d'Expériences présentation et application.

III.1. Introduction	39 -
Partie A : Présentation de la Méthode des Plans d'Expériences	39 -
III.2. Contexte des plans d'expériences.....	39 -
III.3. Objectifs d'utilisation de la Méthode des Plans d'Expériences (MPE).....	40 -
III.3.1. Les plans de criblages ou screening	40 -
III.3.2. Les plans de surface de réponse	40 -
III.4 Quelques notions sur la MPE	41 -
III.4.1 Notions d'espace expérimental.....	41 -
III.4.2 Coordonnées centrées réduites	42 -
III.4.2.1 Changement de l'unité de mesure	42 -
III.4.2.2 Déplacement de l'origine des mesures	42 -
III.4.3 Domaine d'étude	43 -
III.4.4 Notion sur la représentation des plans d'expérimentation.....	43 -
III.4.4.1 Représentation géométrique	43 -
III.4.4.2 Représentation matricielle	44 -
III.4.5 Notions de modélisation mathématique	44 -
III.4.6 Système d'équations	45 -
III.5 Différents plans d'expériences existants	46 -
III.5.1 Plan factoriel complet (PFC).....	46 -
III.5.2 Plan factoriel fractionné	47 -
III.5.3 Plan Rechtschaffner.....	47 -
III.5.4 Plans de Plackett et Burman	47 -
III.5.5 Plans de Koshal	48 -
III.5.6 Tables de Taguchi	48 -
III.6 Conclusions	48 -
Partie B : application de la méthode PFC, pour une estimation quantitative du degré de dommage local et global.	49 -
III.7 Application des plans factoriels complets pour l'estimation du niveau de dommage local	49 -
III.7.1 Partie éléments résistants <i>PER</i>	49 -
III.7.1.1 Construction du plan.....	50 -
III.7.1.2 Représentation sous forme de tableau	50 -
III.7.1.3 Traitement des données	51 -
a- Représentation graphique des effets principaux.....	54 -
b- Représentation graphique des interactions du premier ordre	55 -
c- Représentation graphique des interactions d'ordres supérieures.....	56 -
III.7.2 Modèle d'estimation de la grandeur reflétant l'état d'ensemble des éléments non-structuraux.....	57 -
III.7.2.1 Calcul des inconnus du modèle	58 -
III.7.2.2 Identification des paramètres (facteurs et interactions) influents sur la variation de la réponse D_{ENR}	59 -
III.7.2.3 Représentation graphique des effets des éléments secondaires et de leurs interactions.....	60 -
a- Représentation graphique des effets principaux.....	60 -
b- Représentation graphique des interactions du premier ordre	61 -
c- Représentation graphique des interactions d'ordres supérieure	62 -
III.7.3 Application du PFC pour l'estimation du dommage global	63 -
III.7.3.1 Constructions du PFC dans le cas de l'évaluation des dommages globaux	64 -
III.7.3.2. Présentations des résultats	64 -
III.7.3.3. Calcul des coefficients.....	65 -
a- Développement du coefficient relatif au facteur D_{ER}	65 -
b- Développement du coefficient relatif au facteur D_{ENS}	66 -
c- Développement du coefficient relatif à l'interaction $D_{ER}-D_{ENR}$	67 -
III.7.3.4. Signification des effets	68 -
a- Signification du coefficient attribué au facteur D_{ER}	68 -

b- Signification du coefficient attribué au facteur D_{ER}	- 68 -
c- Signification du coefficient C_{21}	- 69 -
III.8. Comparaison des dommages globaux	- 70 -
III.9. Conclusions	- 71 -

Chapitre IV : Présentation et Application de la théorie des systèmes experts

IV.1. Introduction	- 73 -
IV.2. Intelligence artificielle <i>IA</i>	- 73 -
IV.2.1. Réseau de neurones artificiels	- 73 -
IV.2.2. La logique floue	- 73 -
IV.2.3. Système à base de règle	- 74 -
IV.2.4. Système expert <i>SE</i>	- 74 -
Partie A : Systèmes Experts : aspect théorique.	- 75 -
IV.3. Principe des systèmes experts	- 75 -
IV.4. Domaines recommandés sur l'application des SE	- 75 -
IV.5. Historique et évolution des systèmes experts	- 75 -
IV.5.1. Les principaux systèmes développés dans le domaine de Génie Civil	- 76 -
IV.6. Typologie des systèmes experts	- 76 -
IV.6.1. Système expert dédié	- 76 -
IV.6.2. Système expert Shell	- 77 -
IV.7. Les avantages et inconvénients des SE	- 77 -
IV.8. Architecte des SE	- 77 -
IV.8.1. Architecture de base d'un SE	- 78 -
IV.8.1.1. La Base de Connaissance (BC)	- 78 -
a- La Base de faits (BF)	- 78 -
b- La base de règles (BR)	- 79 -
IV.8.1.2. Le moteur d'inférence (MI)	- 79 -
a- Les caractéristiques d'un MI	- 79 -
b- Cycles d'un moteur d'inférence	- 80 -
IV.8.2. Les composants complémentaires d'un <i>SE</i>	- 81 -
IV.8.2.1. Module d'acquisition de connaissances	- 81 -
IV.8.2.2. Module d'explication	- 81 -
IV.8.2.3. Module d'interface	- 81 -
IV.8.2.4. Module d'ingénierie des connaissances	- 81 -
IV.9. Les étapes de réalisation d'un SE	- 82 -
IV.9.1. Phase de conception	- 82 -
IV.9.2. Phase d'implantation	- 82 -
Partie B : Description et Conception du système <i>EDPS</i>	- 84 -
IV.10. Description du système <i>EDPS</i>	- 84 -
IV.10.1. La catégorie utilisateur ordinaire	- 84 -
IV.10.1.1. Les utilisateurs de types propriétaire	- 84 -
IV.10.1.2. Les utilisateurs de type expert	- 84 -
IV.10.2. La catégorie administrateur	- 84 -
IV.10.3. Récapitulatif des utilisateurs	- 84 -
IV.11. Diagramme des cas d'utilisation	- 85 -
IV.11.1. Séquence d'utilisation par L'Administrateur	- 86 -
a- Premier scénario	- 86 -
b- Deuxième scénario	- 88 -
IV.11.3. Séquences d'utilisation par expert	- 90 -
IV.12. Le diagramme de classe	- 91 -
IV.12.1. Le modèle relationnel	- 92 -
IV.13. Conclusions	- 92 -

Chapitre V : Réalisation du système *EDPS*

V.1. Introduction	95 -
Partie A : Présentation des composants et outils intervenants dans la réalisation de l' <i>EDPS</i>	95 -
V.2. Développement du système <i>EDPS</i>	95 -
V.2.1. Modélisation d' <i>EDPS</i>	95 -
V. 3. Présentation des différents modules de l' <i>EDPS</i>	96 -
V.3.1. La base de connaissances (<i>BC</i>)	96 -
a-La base de faits (<i>BF</i>)	96 -
b- La base de règles (<i>BR</i>)	97 -
V.3.2 Le moteur d'inférence (<i>MI</i>)	97 -
V.3.3. Les modules d'interfaces	97 -
a- L'interface Propriétaire	97 -
b-L'interface Expert	97 -
c-L'interface Administrateur	98 -
V.3.4. Un module d'aide	98 -
V.3.5. Un module d'explication	98 -
V.3.6. Un module d'acquisition de la connaissance	98 -
V.4. Présentation des outils utilisés dans le développement de l' <i>EDPS</i>	98 -
V.4.1. Environnement de développement	99 -
V.4.2. Présentation des outils utilisés	99 -
a- Présentation de SWI-Prolog	99 -
b- présentation de Java	100 -
c- Présentation de l'IDE NetBeans	100 -
d-Présentation de MySQL	101 -
e- Présentation de Java Prolog Link « <i>JPL</i> »	101 -
f-Présentation de Java Data-Base-Connectivity « <i>JDBC</i> »	102 -
V.4.3. Récapitulatif des outils utilisés	102 -
Partie B: Développement de la Base de Connaissance	103 -
V.5. Conception de la <i>BC</i>	104 -
V.5.1. Conception des faits <i>BF</i>	104 -
V.5.1.1. Cas d'évaluation par propriétaire	104 -
V.5.1.2. Connaissances relatives à l'inspection des murs	105 -
a- Les murs intérieurs	105 -
b-Les murs extérieurs	107 -
V.5.1.3. Connaissances relatives à l'inspection des éléments extérieurs	107 -
a- Élément balcon	109 -
b-Élément cheminée	111 -
V.5.1.4. Connaissances relatives à l'inspection des planchers	113 -
V.5.1.5. Connaissances relatives à l'inspection de la Toitures	114 -
V.5.1.6. Connaissances relatives à l'inspection des poteaux	116 -
V.5.1.7. Connaissances relatives à l'inspection des poutres	117 -
V.5.1.8. Connaissances relatives à l'inspection des systèmes de contreventement	121 -
V.5.1.9. Élément Escalier	122 -
V.5.1.10. Connaissances relatives à l'inspection du sol de la construction	123 -
a- Connaissances relatives au sol de la construction	124 -
b-Connaissances relatives à l'inspection des structures adjacentes	125 -
V.5.1.11. Cas d'évaluation par expert	127 -
V.5.2. Conception de la base de règles <i>BR</i>	127 -
V.5.2.1. Les règle d'inférences	127 -
a-Estimation du niveau de dommage	128 -
b-Estimation du nombre de sans-abris NSA(I) :	128 -
c-Introduction de ces modèles dans la <i>BC</i>	128 -
Partie C : Présentation des interfaces du système <i>EDPS</i>	130 -
V.6.Présentations de l' <i>EDPS</i>	130 -

V.6.1. Interface d'accueil	- 130 -
V.6.2. Interface d'authentification pour l'expert.....	- 130 -
V.6.3. Interface Expert	- 131 -
V.6.4. Interface Recherche	- 131 -
V.7. Conclusion.....	- 132 -

Chapitre VI : Mise en application de l'EDPS

VI.1. Introduction	- 124 -
VI.2. Application de l'outil	- 125 -
VI.3. Cas d'évaluation par propriétaire	- 125 -
VI.3.1. Gestion de l'environnement de la construction	- 126 -
VI.3.1.1. Évaluation du sol autour de la construction	- 126 -
VI.3.1.2. Évaluation des structures adjacentes	- 127 -
VI.3.2. Évaluation du danger provenant de la construction elle-même.....	- 129 -
VI.3.2.1. Évaluation des éléments externes de la construction	- 129 -
a- Évaluation des murs extérieurs.....	- 129 -
b- Évaluation des façades.....	- 131 -
c- Évaluation de la Toiture inclinée.....	- 131 -
VI.3.2.2. Évaluation des éléments internes de la construction	- 132 -
a- Évaluation de la cage d'escalier	- 132 -
b- Éléments porteurs.....	- 134 -
c- Éléments de contreventements	- 135 -
d- Évaluation des murs intérieurs	- 136 -
e- Évaluation des planchers.....	- 138 -
f- Évaluation de la Cheminée	- 139 -
g- Évaluation de l'élément «Balcon»	- 141 -
VI.3.3. Estimation du niveau de dommage global	- 142 -
VI.4. Cas d'évaluation par Expert	- 143 -
VI.4.1. Phase d'Authentification.....	- 143 -
VI.4.2. Phase d'avant inspection	- 144 -
VI.4.3. Phase d'inspection de l'environnement de la construction	- 145 -
VI.4.4. Phase d'évaluation de l'infrastructure.....	- 146 -
VI.4.5. Phase d'évaluation des éléments structuraux et non-structuraux.....	- 146 -
VI.4.6. Phase d'évaluation de la catégorie de dommage globale	- 148 -
VI.5. Conclusions.....	- 149 -

Conclusion Générale et perspectives

Références bibliographiques

Liste de Figures

Chapitre II : État de l'art sur l'évaluation des dommages post-sismiques.	Page
Figure II.1. Caractéristiques d'un séisme.	10 -
Figure II.2. Effet du tassement de terrain sur la stabilité des constructions (Vincens & Labbe 2002). -	12 -
Figure II.3. La liquéfaction du sol entraîne le renversement des bâtiments (Plumier & Degee 2011). -	13 -
Figure II. 4. Effet induit par un événement sismique.	13 -
Figure II.5. Illustration du phénomène de résonnance (Guéguen 2009).	14 -
Figure II. 6. Les différents effets des séismes (Guettiche 2017).	14 -
Figure II.7. Désordres enregistrés sur l'élément poteau (Davidovici 2003).	15 -
Figure II.8. Illustration de quelques dommages constatés sur l'élément poutre (AFPS 2003).	16 -
Figure II.8. Dommages constatés sur les portiques (Davidovici 2003).	16 -
Figure II.9. Dommages constatés sur l'élément voile (OFPP 2010).	17 -
Figure II. 10. Dommages enregistrés pour les éléments de maçonnerie (Davidovici 2003).	17 -
Figure II. 11. Dommages enregistrés pour l'élément escalier (Hiroto Kato et al. 2010).	18 -
Figure II. 12. Dommages enregistrés pour l'élément Balcon (OFPP 2010).	18 -
Figure II.13. Guide utilisé par les autorités Algériennes pour l'évaluation des dommages après séisme (Bertero & Harehsh1981 ; Boukri et al. 2014).	24 -
Figure II.14. Un bâtiment effondré par le séisme de Boumerdes (Mesleme et al. 2011).	28 -
Figure II.15. Un bâtiment de 4 étages qui a subi des dommages légers (Mesleme et al. 2011).	29 -
Figure II.16. Détection des dommages avec précision un bâtiment fortement incliné (Mesleme et al. 2011).	30 -
Figure II.17. Un cas où il est difficile de voir de gros dégâts en utilisant uniquement l'image post-événement; les débris entourant les bâtiments sont cachés par l'ombre (Mesleme et al. 2011).	31 -
Figure II.18. Un bâtiment de quatre étages ayant subi des dommages légers (Meselem et al. 2011). -	32 -
 Chapitre III : Méthode des Plans d'Expériences présentation et application.	
Figure III.1.Contexte d'utilisation des plans d'expériences (Ben 1994).	39 -
Figure III.2.Domaine de variation d'un facteur (Goupy 1999).	41 -
Figure III.3.Représentation de l'espace expérimental (Goupy & Creighton 2006).	42 -
Figure III.4.Domaine d'étude défini par l'union des domaines des différents facteurs (Goupy & Creighton 2006).	43 -
Figure III.5.Représentation géométrique d'un plan à deux facteurs (Wilson 2010).	44 -
Figure III.6.Diagramme des effets des facteurs de la PER et de leurs interactions.	53 -
Figure III.7.Représentation graphique des effets principaux.	54 -
Figure III.8.Représentation graphique des interactions de premier ordre de la partie éléments résistants.	55 -
Figure III.9.Représentation graphique des interactions d'ordres supérieurs pour les éléments résistants.	56 -
Figure III.10.Effets des facteurs « éléments résistants » et de leurs interactions.	59 -
Figure III.11.Représentation graphique des effets principaux.	60 -
Figure III.12. Représentation graphique des interactions de premier ordre de la partie éléments résistants.	61 -
Figure III.13.Représentation graphique des interactions d'ordre supérieur, de la partie éléments non- résistants.	62 -
Figure III.14.Représentation du plan d'expérience.	64 -
Figure III.15.Représentation des réponses D_G , en divers points du domaine d'étude.	65 -
Figure III.16.Représentation de l'effet du paramètre D_{ENR}	68 -
Figure III.17.Représentation de l'effet du paramètre D_{ER}	68 -

Figure III.18. Illustration de l'interaction entre D_{ENR} et D_{ER}	- 69 -
--	--------

Chapitre IV: Présentation et Application de la théorie des systèmes experts

Figure IV.1. Les différentes branches de l'intelligence artificielle (Zadeh 1999).	- 73 -
Figure IV.2. Schéma simplifié illustrant le principe des SE.	- 75 -
Figure IV.3. Architecture complète d'un SE (Shen et al. 2010).	- 78 -
Figure IV.4. Le cycle d'un moteur d'inférence (Merritt 2001).	- 81 -
Figure IV.5. Schéma explicatif définissant les différentes étapes de la phase de conception (Kendal & Creen 2007).	- 82 -
Figure IV.6. Différentes catégories d'utilisateurs du système EDPS.	- 84 -
Figure IV.7. Diagramme de cas d'utilisation global du système EDPS.	- 85 -
Figure IV.8. Diagramme de séquence de cas d'utilisation «S'authentifier en tant qu'administrateur».	- 86 -
Figure IV.9. Diagramme de séquence de cas d'utilisation «ajouter un expert».	- 87 -
Figure IV.10. Diagramme de séquence de cas d'utilisation «consulter une évaluation».	- 89 -
Figure IV.11. Diagramme de séquence de cas d'utilisation «évaluer une construction en tant qu'expert».	- 90 -
Figure IV.11. Diagramme de classe du système EDPS.	- 91 -

Chapitre V : Réalisation du système EDPS

Figure V.1. Architecture de l'EDPS.	- 96 -
Figure V.2. Schéma de la JPL (Rizzo&Machanic 2005).	- 101 -
Figure V.3. Résumé des divers dispositifs utilisés.	- 102 -
Figure V.4 Exemple de structures endommagées (Baggio et al. 2007).	- 104 -
Figure V.5. description des catégories de dommages pour l'élément mur intérieur.	- 105 -
Figure V.6. Description des catégories de dommages pour l'élément mur extérieur.	- 106 -
Figure V.8. Schématisation des étapes d'identification des dommages sur l'élément mur.	- 107 -
Figure V.9. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément Balcon.	- 109 -
Figure V.10. Recapitulatif de la méthode d'identification des dommages sur les balcons.	- 109 -
Figure V.11. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément cheminé.	- 110 -
Figure V.12 Recapitulatif sur l'identification des dommages au niveau des cheminés.	- 111 -
Figure V.13. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément plancher.	- 113 -
Figure V.14 Recapitulatif de l'identification des dommages au niveau des planchers.	- 113 -
Figure V.15. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément toiture inclinée.	- 115 -
Figure V.16. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément poteau.	- 116 -
Figure V.17. Recapitulatif sur l'identification des dommages au niveau des poteaux.	- 117 -
Figure V.18. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément poutre.	- 118 -
Figure V.20. Recapitulatif sur l'identification des dommages au niveau des poutres.	- 119 -
Figure V.19. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément voile.	- 120 -
Figure V.21. Dommages inspectés sur l'élément escalier.	- 121 -
Figure V. 22. Récapitulatif de la démarche d'identification des dommages au niveau de l'élément escalier.	- 122 -
Figure V.23. les différents désordres du sol de la construction.	- 123 -
Figure V.24. Identification des dommages au niveau du sol.	- 124 -
Figure V.25. description du danger dû à l'instabilité des constructions adjacentes.	- 124 -
Figure V.26. Identification des dangers issus des constructions avoisinantes.	- 124 -

Figure V.27. Interface d'accueil du logiciel.....	- 129 -
Figure V.28. Interface d'authentification de l'expert.	- 130 -
Figure V.29. L'interface Expert.....	- 130 -
Figure V.30.Interface de recherche.	- 131 -

Chapitre VI : Mise en application de l'EDPS.

Figure VI.1. Page d'accueil du système <i>EDPS</i>	- 132 -
Figure VI.2. Introduction d'informations d'ordre générales.	- 133 -
Figure VI.3. Images reflétant l'état du sol après séisme (AFPS 2003).	- 134 -
Figure VI.4. Identification des menaces provenant de l'état du sol de la construction.	- 134 -
Figure VI.5. Structure menacée par l'instabilité des autres (AFPS 2003).....	- 135 -
Figure VI.6. Identification dans <i>EDPS</i> des menaces extérieures dues à l'endommagement des structures adjacentes.....	- 135 -
Figure VI.7. Réponse d' <i>EDPS</i> après inspection de l'environnement.....	- 136 -
Figure VI.8. Familles de dommages pouvant apparaître sur l'élément «Murs extérieurs».....	- 137 -
Figure VI.9. Exemple d'évaluation dans <i>EDPS</i> d'une famille de désordre.	- 137 -
Figure VI. 10. Inspection dans <i>EDPS</i> des murs de façade.	- 138 -
Figure VI.11. Exemple d'une toiture endommagée.	- 138 -
Figure VI.11. Évaluation dans <i>EDPS</i> de l'élément « toiture inclinée ».	- 139 -
Figure VI. 13. Présentation d'un escalier endommagé après séisme.	- 140 -
Figure VI. 13. Inspection de l'élément «Escalier» avec l' <i>EDPS</i>	- 140 -
Figure VI.14.Présentation d'un poteau endommagé.	- 141 -
Figure VI.15. Évaluation du composant « Élément porteur » avec <i>EDPS</i>	- 142 -
Figure VI.16.Présentation d'un élément de contreventement endommagé.....	- 142 -
Figure VI.17. Inspection dans <i>EDPS</i> du composant «Éléments de contreventement».	- 143 -
Figure VI.18. Mur intérieur endommagé.	- 144 -
Figure VI. 19. Inspection de l'élément «mur intérieur».	- 144 -
Figure VI.20. Dommages occasionnés à l'élément «Planchers».....	- 145 -
Figure VI.21. Évaluation des désordres occasionnés à l'élément Plancher (image 1).	- 145 -
Figure VI.22. Évaluation des désordres occasionnés à l'élément Plancher (image 2).	- 146 -
Figure VI.23. Dommage apparu sur l'élément «Cheminée».....	- 147 -
Figure VI.24. Interface pour l'évaluation de l'élément «Cheminée».....	- 147 -
Figure VI.25. Présentation d'un élément «Balcon» endommagé.....	- 148 -
Figure VI.26. Interface permettant d'inspecter l'élément « Balcon ».	- 148 -
Figure VI.27. Réponse finale de l' <i>EDPS</i> dans le cas d'évaluation par propriétaire.....	- 149 -
Figure VI.28. Authentification de l'expert.	- 150 -
Figure VI. 29. Première interface de l'évaluation par Expert.	- 151 -
Figure VI.30. Introduction d'informations d'ordres générales.....	- 151 -
Figure VI.31. Identification des désordres autour de la construction.	- 152 -
Figure VI. 32. Message d'alerte pour l'Expert.....	- 152 -
Figure IV. 33. Interface pour l'évaluation de l'infrastructure.	- 153 -
Figure VI.34. Évaluation des éléments structuraux.....	- 154 -
Figure VI.35. Évaluation des éléments non-structuraux.	- 155 -
Figure VI.36.Réponse finale donnée par <i>EDPS</i>	- 155 -

Liste des tableaux

Chapitre II : État de l’art sur l’évaluation des dommages post-sismiques.	Page
Tableau II.1. Conclusion possible suite à une évaluation avec <i>AeDES</i>	19 -
 Chapitre III : Méthode des Plans d’Expériences présentation et application.	
Tableau III.1.Représentation matricielle d’un plan à deux facteurs.	44 -
Tableau III.2.Représentation du tableau d’expérimentations A et du plan d’expériences B.....	50 -
Tableau III.3. Matrice des effets « matrice du modèle » notée X.	51 -
Tableau III.4. Résultats d’endommagement de l’ensemble des éléments structuraux.	52 -
Tableau III.5. Poids des facteurs et des interactions intervenant sur la réponse D_{ER}	53 -
Tableau III.6. Résultats de l’endommagement de l’ensemble des éléments non structuraux.	58 -
Tableau III.7. Les poids des facteurs et de leurs interactions intervenant sur le D_{ENR}	58 -
Tableau III.8. Les réponses globales.	65 -
Tableau III.9. Récapitulation des effets.....	68 -
Tableau III.10. Les différents niveaux de dommages attribués aux composants.	70 -
Tableau III.11. Validation du modèle proposé.	70 -
 Chapitre IV : Présentation et Application de la théorie des systèmes experts.	
Tableau IV.1. Présentation de quelques <i>SE</i> développés dans le domaine de Génie Civil.....	76 -
 Chapitre V : Réalisation du système <i>EDPS</i>.	
Tableau V.1. Les différentes classes de dommages, cas d’évaluation par Propriétaire (Baggio et al. 2007).....	125 -
Tableau V.2. Les différents degrés de dommage, cas d’évaluation par expert (Grünthal & Levret 2001).....	126 -
 Chapitre VI : Mise en application de l’<i>EDPS</i>.	
Tableau VI.1. Résumé de la fiche d’évaluation utilisée.	154 -

Chapitre I

Introduction Générale

Sommaire du chapitre I

I.1.	Introduction	2
I.2.	Problématique.....	5
I.3.	Objectifs de la thèse	6
I.4.	Méthodologie d'approche	6
I.5.	Plan de la thèse.....	7

I.1. Introduction

L'impact croissant des catastrophes naturelles sur les zones habitées engendre de nombreuses pertes humaines et matérielles, ce qui met en évidence l'urgence représentée par *la gestion des risques* et *la gestion de crises* dans les régions vulnérables. Parmi toutes ces catastrophes, les tremblements de terre ont été et resteront, probablement pour longtemps, les phénomènes naturels les plus dangereux, du fait de leur caractère imprévisible et leur effet particulièrement destructeur. Selon (Coburn & Spence 2002 ; Bendimerad 2002), durant le dernier siècle, ces phénomènes ont affecté plus de 80 pays et ont causé la mort de plus de 1,6 millions de personnes.

L'Algérie n'échappe pas à cette situation, la majorité du vieux bâti algérien est érigé en totale ignorance des risques sismiques (Boukri et al. 2013). La grande partie du parc immobilier a été construite avant l'apparition du premier Règlement Parasismique Algérien en 1981 (RPA 81). Les pertes occasionnées, tant sur un bilan humain que matériel, prouvent que cette thématique relève d'une importance capitale.

Pour se protéger des tremblements de terre, l'Algérie c'est dotée d'un protocole préparatoire pour la gestion de crise sismique. Celui-ci est obtenu par un cheminement de plusieurs tâches complémentaires suivant un ordre logique. D'une manière générale, ce protocole peut être représenté par trois phases très distinctes : «pré-crise», «pendant la crise» et «post-crise». Ces dernières années, en particulier après le séisme de Boumerdes en 2003, les dirigeants politiques de notre pays et les responsables des organismes de gestion de crise «CGS» ont pris conscience de la vulnérabilité des centres urbains situés en zone sismique. Ainsi, un vaste programme d'action axé sur l'intégration de la prévention des risques majeurs en tant que paramètre essentiel dans différents programmes de développement, d'aménagement du territoire et d'urbanisme est proposé. Parmi les travaux réalisés on retrouve, entre autres, ceux qui s'inscrivent dans :

- La phase pré-crise : les recherches effectuées durant cette phase, se concentrent en grande partie sur : l'évaluation de la vulnérabilité du bâtis existants (Hamizi et al. 2008; Hamizi et al. 2010 ; Boukais et al. 2013; Kahil et al. 2017; Nekmouche et al. 2017), la réalisation des différents scénarios pouvant apparaître après séisme (Boukri et al. 2018), les nouvelles mesures à prendre pour assurer un meilleur aménagement du territoire et la prise en charge du risque par les assurances.
- La phase post-crise : les études effectuées durant cette phase se focalise sur l'amélioration du niveau de protection des nouvelles constructions. À cet effet, en plus

de la prise en compte des progrès scientifiques, l'actualisation des différents codes de construction et règlements parasismiques est effectuée aussi suivant les conclusions tirées du retour d'expérience. Exemple, l'édition de cinq (05) versions successives du RPA, révisées et enrichies après chaque événement sismique (entre 1981 et 2003).

Sachant que, l'apparition des dommages est un fait inévitable après de tels événements, en plus des deux actions préventives évoquées ci-dessus (phases pré et post crise), il est donc important de procéder à une amélioration de la gestion de la situation «pendant la crise». Parmi les tâches figurant dans cette phase, pour diverses raisons, celle de l'évaluation des dommages joue un rôle très important (Akkouche et al. 2019). Elle permet d'une part, d'accélérer le secours des personnes qui peuvent encore l'être après le choc principal et d'une autre part, de les aider aussi à reprendre une vie normale le plus tôt possible. À cet effet, la communauté scientifique et la société civile s'accordent pour souligner le caractère primordial de l'évaluation des dommages occasionnés aux bâtis.

Suivant cette optique, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés et acceptés comme une tâche hautement prioritaire par la communauté scientifique du génie parasismique (Akkouche et al. 2019). Parmi les divers objectifs fixés initialement, l'amélioration et la simplification des procédures d'inspections visuelles étaient les plus répondues, telles que :

- Le développement d'échelles de classification et de catégorisation des dommages successifs aux séismes (Coburn 1989; Grunthal et al. 1998; Okada et al. 2009);
- La mise en œuvre de procédures d'évaluation de dommage post-sismique (ATC20 ; Saito et al. 2004; Chiroiu et al. 2005; Bagio et al. 2007; Agnastopoulos et al. 2008; Perrone 2015), ou à l'amélioration de procédures déjà existantes (Rathje et al. 2005; Saito et al. 2005; Yamazaki & Matsuoka 2007; Rathje & Adams 2008; Adams & Eguchi 2008; Meselem et al. 2011; Elenas et al. 2013; Shao et al. 2014; Usta et al. 2018; Allali et al. 2018).

L'enquête post-sismique, en Algérie, est menée par une approche simplifiée, basée sur le formulaire d'évaluation (développé par le CTC et le CGS) (Boukri et al. 2014). Ce formulaire est le résultat de l'expérience de terrain, affiné après plusieurs tremblements de terre passés. De plus, de la simplicité et la commodité de cette approche, elle présente l'avantage de standardiser la description des dommages et permet d'établir des évaluations avec un langage commun. Néanmoins, de nombreuses difficultés et conflits peuvent surgir pendant l'exécution de cette tâche, engendrant en conséquence des classifications subjectives. Parmi ces

imprécisions qui peuvent apparaître, on cite d'une part, celles qui sont liées à l'estimation du dommage global dépendant essentiellement de l'expertise et du jugement de l'expert (Baggio et al. 2007), et d'autre part, celles qui sont en relation directe avec le fait qu'aucune valeur seuil n'est définie rigoureusement entre deux catégories de dommages successives (Sinha et al. 2012; Noura et al. 2017).

Par ailleurs, la réussite du diagnostic (évaluation qualitative) n'est pas fondamentalement liée aux normes usuelles d'appréciation de dommages, mais elle est en étroite relation avec l'exactitude du jugement de l'expert (Carreño et al. 2010). Par conséquent, une réponse incorrecte de l'expert, en consignait son appréciation, peut être une source d'incertitude accrue vis-à-vis de la sécurité des occupants d'une structure déjà endommagée (Davidovici 2003). À cet effet, le passage d'une évaluation qualitative à une évaluation quantitative devient un impératif. Ces évaluations qui s'appuient sur le développement de modèles de prédiction mathématique sont de plus en plus proposées dans la littérature (Olson & Dash-wu 2010). De tels modèles se fondent sur des bases de données bien spécifiques (le mode de construction, la zone d'implantation, le sol d'assise, l'environnement du bâti ...etc.) qui en réduisent leurs applicabilités. Autrement dit, l'utilisation de ces modèles dans le contexte du bâti Algérien induit des erreurs systématiques. Dans cette perspective, un nouvel outil basé sur des modèles de prédiction des dommages correspondant au mode de construction Algérien est proposé dans ce travail de thèse.

Ces modèles mathématiques, permettant la quantification du niveau de dommage global de la structure, développés dans ce travail de recherche constituent la première partie de l'étude. Quant à, la deuxième partie, elle se concentre sur la conception et la mise-en-œuvre d'un outil informatique (nommé *EDPS* : Évaluation de Dommage Post-Sismique). *EDPS* se base essentiellement sur les trois modèles développés initialement et un ensemble de connaissances relatives au domaine. Enfin, après la présentation des différentes interfaces (expert et propriétaire), ce travail se termine par une étude comparative entre les résultats obtenus quantitativement par l'outil *EDPS* et ceux estimés qualitativement par l'inspecteur (fiche d'évaluation).

I.2. Problématique

Lorsqu'un séisme frappe une région et que des dommages sont causés aux bâtiments, les autorités en charge de la gestion post-catastrophe doivent pouvoir proposer aussi rapidement que possible une vue globale de la situation dégradée (Auclair et al. 2014, 2015). Afin d'entreprendre les actions répondantes aux besoins immédiats, avant toutes initiatives, il est

important de procéder à une inspection de dommages. Une tâche inévitable pour la bonne gestion de la situation post-catastrophe, puisqu'elle représente l'unique moyen permettant l'identification des bâtiments sûrs et ceux qui ne le sont pas. Selon (Goretti & Pasquale 2004; Hisada et al. 2004), l'enquête sur le terrain demeure l'option la plus commune et la plus fiable. Le principe d'évaluation de cette approche (évaluation in situ) nécessite de passer par deux étapes; la première consiste à mener une enquête à l'échelle de l'élément structural; la seconde, pour prendre une décision sur l'état général de la construction sur la base des conclusions de la première.

En Algérie, l'enquête post-sismique est menée par une approche simplifiée, basée sur le formulaire d'évaluation. Ce dernier est le résultat de l'expérience de terrain, affiné après plusieurs tremblements de terre passés. En effet, lors de ces inspections visuelles, ce formulaire a permis l'établissement d'un langage commun et standard pour la description des dommages. Cependant, l'expérience acquise des différents tremblements de terre (en particulier le séisme de Zemmouri à Boumerdes en 2003) a confirmé que plusieurs problèmes peuvent surgir durant cette phase d'évaluation de dommages. Parmi ceux-là, on distingue d'une part ceux liés à la subjectivité de quelques résultats due à des inspections non conformes menées par des professionnels non experts. En conséquence, les surestimations injustifiées de l'expert peuvent engendrer des évacuations massives, alors qu'une évaluation moins attentive (sous-estimation) peut exposer les résidents à des risques avec un degré incertain de dommages. D'autre part, ceux liés aux délais de cette même inspection, qui peuvent causer des désarrois aux occupants nécessitant la réintégration de leurs domiciles peu de temps après le passage de l'onde principale.

Pour essayer de remédier à ces imperfections, c.-à-d., faire face efficacement au désastre d'un tremblement de terre et réduire sa gravité, plusieurs travaux de recherche ont été lancés au niveau du Laboratoire de Modélisation des Matériaux et des Structures de Génie Civil (Hamizi et al. 2008, 2010; Kezmane et al. 2014; Boukais et al. 2013; Kahil et al. 2017; Nekkouché et al. 2018; Akkouché et al. 2019) par l'équipe de recherche «pathologie, vulnérabilité et réhabilitation des structures». Cette thèse de Doctorat en fait partie.

I.3. Objectifs de la thèse

Cette thèse se situe dans le cadre de la gestion des situations critiques causées par les séismes.

L'objectif principal de ce travail de recherche est de développer un outil interactif permettant la prise de décision aux inspecteurs expert et non-experts (ingénieurs de bureaux d'études et architectes) lors de l'inspection de dommages, aussi de faire participer les personnes hors du domaine (les assureurs, les propriétaires ... etc.) dans la phase de gestion de crise. Les étapes suivantes ont été définies pour atteindre ces objectifs:

- Formulation d'une base de connaissances, relative au domaine d'inspection de dommages.
- Développement de modèles mathématiques, permettant d'estimer la catégorie de dommage global d'une manière quantitative et en prenant en considération le niveau de dommage des éléments structuraux et non-structuraux.
- Développer un système qui intègre tous les développements antérieurs dans un environnement automatisé convivial, pouvant être affiné à l'aide d'études de cas.

I.4. Méthodologie d'approche

Notre travail est scindé en deux parties très distinctes :

Dans un premier temps, l'étude consiste à développer un modèle qui permettra de créer une relation logique entre la catégorie de dommage global de la structure et celle de ses différents composants structural et non-structural. La démarche proposée repose essentiellement sur un traitement statistique effectué sur une base de données post-sismique, constituée de 8 390 formulaires d'évaluation. Ce traitement est basé sur la théorie des plans d'expériences (Montgomery 1997). Ainsi, en se référant au prototype d'inspection utilisé par les autorités algériennes, une modélisation est conçue dans le but de faire ressortir :

- La grandeur qui reflète l'état d'ensemble des éléments résistants notée D_{ER} en fonction de l'état de l'élément : « porteur D_{EP} , contreventement D_{EC} , plancher-toiture-terrasse D_{EPT} et toiture inclinée D_{ETI} »,
- La grandeur qui indique l'état de l'ensemble des éléments secondaires D_{ENR} en fonction des niveaux de dégâts associés à l'élément « Escalier D_{EES} , Remplissage Extérieur D_{ERE} , Éléments Intérieurs D_{EEI} et Éléments Extérieurs D_{EE} ».
- La grandeur qui caractérise l'état de la structure dans son ensemble D_G en fonction des dommages locaux recensés « D_{ER} et D_{ENR} ».

Dans un second temps, l'étude est consacrée au développement d'un système expert à base de connaissances nommé *EDPS*. La réalisation de cet outil s'articule, d'abord sur la confection d'une base de connaissances relatives au domaine d'évaluation de dommages, puis

sur la sélection de certains outils de programmation. Ces connaissances introduites dans l'outil sont recueillies auprès de différentes sources, La 1^{ère} source primaire étant créée sur la base d'entretiens avec des experts professionnels, la 2^{ème} source provient de bases de données spécialisées, de livres, d'articles et de quelques sites web électroniques. Enfin, pour améliorer la prise de décision, des règles d'inférence et heuristique ont été introduites dans la base de règles (base de connaissances) sous forme de conditions et de modèles mathématiques.

I.5. Plan de la thèse

Outre que les objectifs définis ci-dessus, la structure de la présente thèse est organisée comme suit:

Le chapitre 1 est consacré à la présente introduction générale.

Le chapitre 2 est scindé en deux parties, dans la première, une brève introduction aux séismes et les différents phénomènes pouvant être engendrés est présentée, puis une description de certains dommages pouvant apparaître après de tels événements est exposée. Dans la deuxième partie, les différentes procédures d'évaluation de dommages post-sismiques sont passées en revue, illustrant les avantages et les limites de chacune de ces méthodes.

Le chapitre 3 est partagé en deux parties, dans la première, une présentation détaillée des aspects théoriques de la méthode des plans d'expériences est exposée. En se référant aux principes de cette théorie, dans la seconde partie, nous avons procédé au développement de trois modèles mathématiques permettant de quantifier les niveaux de dommages des grandeurs représentant l'état de l'ensemble des éléments structuraux, non-structuraux et l'état de la structure.

Le chapitre 4 est sectionné en deux parties, dans la première, la théorie des systèmes experts et de leurs antécédents est exposée en détail. Dans la deuxième, une description de l'outil *EDPS* (Évaluation des Dommages Post-Sismiques) et de sa base de connaissances a été réalisée.

Le chapitre 5 se concentre sur la dernière étape du projet, à savoir la mise en œuvre et la vérification de l'outil. Il présente la méthodologie de développement d'un prototype de système en tant qu'outil d'aide à la décision pour l'évaluation des dommages.

Dans le chapitre 6, une mise en application de l'outil *EDPS* est effectuée avec les deux cas d'utilisation. Une évaluation avec l'interface Propriétaire est montrée dans un premier temps,

dans un second temps, une inspection avec l'interface Expert est exposée puis comparée à celle effectuée avec la fiche d'expertise.

Les différentes conclusions obtenues dans ce présent travail de recherche, ainsi que certaines perspectives pour des travaux futurs sont données à la fin de ce manuscrit.

Chapitre II

État de l'art sur l'évaluation des dommages post-sismiques

Sommaire du chapitre II

II.1. Introduction	10 -
Partie A : Quelques notions sur les séismes.	10 -
II.2. Les séismes.....	10 -
II.3. Historique de la sismicité Algérienne.....	10 -
II.3.1. Les séismes ayant marqué la sismicité de l'Algérie	11 -
II.3.1.1. Séisme d'El Asnam du 10 Octobre 1980.....	11 -
- Conséquences du séisme d'El Asnam.....	11 -
II.3.1.2. Séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003	11 -
- Conséquences du séisme de Boumerdes	11 -
II.4. Les effets des séismes.....	12 -
II.4.1. Effets indirects.....	12 -
a- Les tassements.....	12 -
b-La liquéfaction	12 -
c- Les mouvements de terrain	13 -
d- Les effets de résonances.....	14 -
e- Récapitulatif sur les effets des séismes	14 -
II.4.2. Les effets directs.....	15 -
II.4.2.1. Dommages constatés sur les éléments structuraux	15 -
a- Dommages constatés sur l'élément poteau	15 -
b- Dommages sur l'élément poutre	15 -
c- Dommages au voisinage du nœud.....	16 -
d- Dommages sur le composant voile	17 -
II.4.2.2. Dommages constatés sur les éléments non-structuraux.....	17 -
a- Dommages sur l'élément murs en maçonnerie	17 -
b- Dommage constaté sur l'élément escalier.....	18 -
c- Dommage constaté sur l'élément balcon.....	18 -
II.5. Méthodes d'inspection des dommages.	19 -
II.5.1. Premier outil : Fiche d'évaluation des dommages.....	19 -
II.5.1.1. Fiche d'inspection italienne – fiche AeDES.....	19 -
II.5.1.2. Fiche d'inspection des USA	20 -
II.5.1.3. Fiche d'inspection Grec.....	20 -
II.5.1.4. Fiche d'inspection Turque	21 -
II.5.1.5. Fiche d'inspection Japonaise	22 -
II.5.1.6. Fiche d'évaluation utilisée en Algérie	22 -
II.5.1.7. Avantages et inconvénients de la première méthode d'inspection	25 -
a- Avantages.....	25 -
b- Inconvénients	25 -
II.5.2. Deuxième méthode : Imagerie satellitaire	26 -
II.5.2.1. Utilisation de l'imagerie satellitaire dans le cas du bâti Algérien.....	27 -
II.5.2.2. Avantages et inconvénients de l'imagerie satellitaire.....	32 -
a- Avantages de l'IS	32 -
b- Inconvénients de l'IS	33 -
Partie B : Travaux réalisés sur les méthodes d'inspection des dommages post-sismiques.	33 -
II.6. Conclusions	36 -

II.1. Introduction

Ce chapitre est subdivisé en deux parties principales. Une rétrospective sur les séismes et leurs effets. Présentation des différentes méthodes d'inspection des dommages post-sismiques, avec un exposé détaillé des deux méthodes adoptées dans le cas d'évaluation des dommages post-sismiques en Algérien. Et, une présentation exhaustive des différents travaux effectués dans la même thématique.

Partie A : Quelques notions sur les séismes.

II.2. Les séismes

Le séisme résulte d'une libération soudaine d'énergie qui s'accumule dans la croûte terrestre. Les séismes se manifestent sous forme de vibrations (ondes sismiques), pouvant parcourir des distances allant jusqu'à plusieurs centaines de mètres (figure II.1).

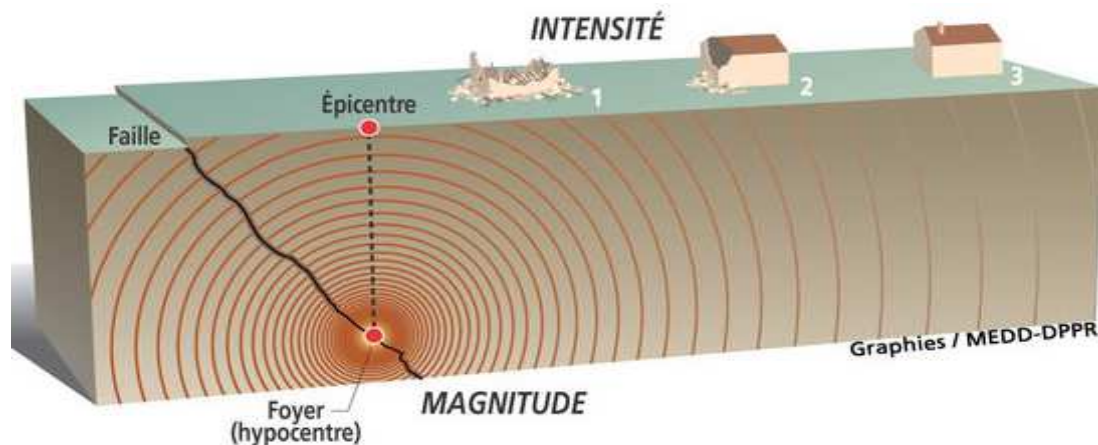


Figure II.1. Caractéristiques d'un séisme.

II.3. Historique de la sismicité Algérienne

Selon (Abbacha 2015), les premiers événements historiques répertoriés en Algérie datent des années 800, mais le catalogue commence à devenir plus fourni à partir du XIII et XIVème siècles. Dans une période lointaine, nous pouvons citer les événements: d'Alger de 1365, 1716, d'Oran de 1790, de Jijel de 1856 (Abbacha 2015). Dans une période récente, nous pouvons citer les séismes : d'El Asnam du 10/10/1980 (Ouyed et al. 1981), de Constantine du 27/10/1985 (Bounif et al. 1987), de Tipaza ou Mont Chenoua du 29/10/1989 (Meghraoui 1991), de Mascara du 17/08/1994 (Benouar et al. 1996), d'Alger du 04/09/1996 (Yelles et al. 2001), de Ain Temouchent du 22/12/1999 (Yelles et al. 2004), de Beni-Ouartilane du 10/11/2000 (Yelles et al. 2001) et de Boumerdes du 21/05/2003 (Belazougui 2008).

II.3.1. Les séismes ayant marqué la sismicité de l'Algérie

Selon les travaux de Beldjoudi (2011), parmi tous ces séismes, seul deux d'entre eux (d'El Asnam et de Boumerdes) ont été reconnus par les autorités algériennes, comme étant des séismes majeurs.

II.3.1.1. Séisme d'El Asnam du 10 Octobre 1980

Ce séisme superficiel (36.16 N°, 1.39° E, profondeur = 10 km) reste le plus violent ($M_s=7.3$) survenu à l'Atlas Tellien occidental (Beldjoudi 2011). Ce séisme a laissé des traces de surface visibles sur 40 km le long de la faille, avec un rejet vertical maximum observé de 6 mètres (Ouyed et al. 1981). Aussi, il a été ressenti sur un rayon de 350 Km et son intensité a été estimée à IX sur l'échelle MSK.

- *Conséquences du séisme d'El Asnam*

Le bilan de cette catastrophe fut terrible, des habitations, des locaux (administratifs et commerciaux) et des immeubles ont été effondrés, des milliers de pertes en vies humaines (2 633 morts) et des milliers de sans-abri. D'après Ouyed et al. (1981), El-Asnam s'est retrouvé déconnecté du reste du pays : liaisons téléphoniques, électricité et gaz coupés, et la ligne ferroviaire entre Alger - El-Asnam était hors d'usage.

II.3.1.2. Séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003

Ce séisme a secoué la région de Boumerdes le 21 Mai 2003 à 19h 44mn (heure locale). De magnitude 6.8, il est le séisme le plus violent qui s'est produit au nord de l'Algérie après le séisme d'El Asnam de 1980 (Davidovici 2003; Belazougui 2008). Il a été ressenti sur un rayon de 250 km.

- *Conséquences du séisme de Boumerdes*

Les conséquences de ce catastrophe furent catastrophique, des milliers de pertes en vies humaines (plus de 2000 morts, sans compter les autres victimes ; 270 000 sans-abris) et des pertes matérielles considérables (de plusieurs dizaines de milliers). Selon l'étude de Belazoughi (2008), parmi les 97 044 constructions évalués, 94,5% d'entre-elles (soit 91 735 constructions) étaient des bâtiments résidentiels, aussi il a été consigné que parmi toutes ces constructions:

- 53 496 sont classés dans les niveaux 1 et 2 (couleur verte), c'est-à-dire parmi les bâtiments n'ayant subi pratiquement aucun dommage ou ayant subi des dommages légers nécessitant une réparation simple. Le pourcentage de cette classe représente 55.12%.

- 32 904 sont classés dans les niveaux intermédiaires 3 et 4 (couleur orange), ce qui signifie que ces bâtiments nécessitent une expertise plus approfondie, pour la réparation et le renforcement futurs. Le pourcentage de cette classe représente 33,91%.

- 10 644 sont classés au niveau 5 (couleur rouge), ce qui signifie que ces constructions ont été partiellement ou totalement effondrées et nécessitent une démolition et une reconstruction ultérieure selon le code sismique. Cette classe représente 10,97%.

II.4. Les effets des séismes

Après passage d'une onde sismique, différents dommages peuvent être causés à une même construction. Généralement, ces dégâts sont dits, locaux (à l'échelle d'un ou de plusieurs éléments) ou globaux (instabilité de la construction), respectivement, lorsque l'effet du séisme est direct ou indirect sur la construction.

II.4.1. Effets indirects

Après séisme, plusieurs types de phénomènes naturels peuvent être déclenchés (Dif et al. 2011). Parmi ces derniers, les plus fréquents sont :

a- Les tassements

Des sables secs soumis à des vibrations peuvent subir des tassements importants. Différentiels ou non, ils peuvent être suffisants pour rendre une construction inutilisable (figure II.2). Ces tassements peuvent atteindre quelques dizaines de cm.



Figure II.2. Effet du tassement de terrain sur la stabilité des constructions (Vincens & Labbe 2002).

b- La liquéfaction

Les sables fins saturés en eau peuvent être le siège d'un phénomène encore plus spécifique au contexte sismique : la liquéfaction des sols (Guéguen 2009). Tel qu'illustré à la figure II.3., ce phénomène peut entraîner des effets catastrophiques.

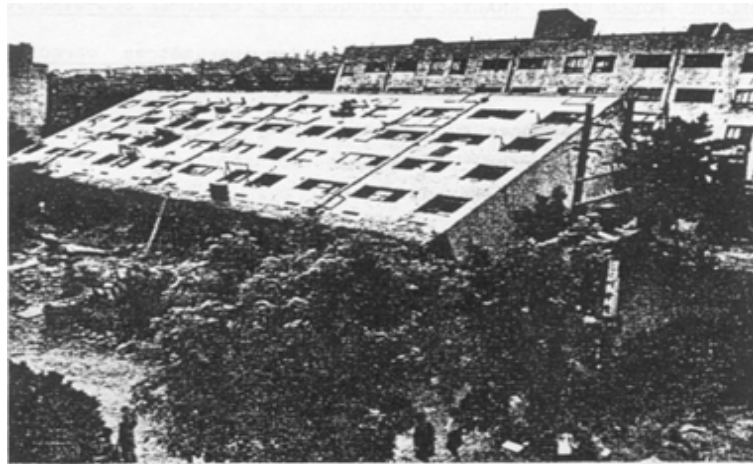


Figure II.3. La liquéfaction du sol entraîne le renversement des bâtiments (Plumier & Degee 2011).

c- Les mouvements de terrain

Un versant stable peut se trouver en déséquilibre sous la sollicitation dynamique du séisme (Plumier 2007). Ainsi, par modification des conditions de l'équilibre géotechnique, de tels phénomènes peuvent provoquer des mouvements de terrain, tels que les glissements, les chutes de blocs ...etc. (figure II.4).



(a) Glissement de terrain (Carreno 2010)



(b) Chutes de blocs (Ousalem & Bechtoula 2003)

Figure II. 4. Effet induit par un événement sismique.

d- Les effets de résonances

La résonance représente le phénomène selon lequel un système mécanique est sensible à certaines fréquences. Si la sollicitation est entretenue à une fréquence égale à celle de la structure, des dommages irréversibles seront occasionnés à cette dernière (figure II.5).



Figure II.5. Illustration du phénomène de résonance (Guéguen 2009).

e- Récapitulatif sur les effets des séismes

Après un événement sismique, plusieurs dommages peuvent apparaître et tel que présenté ci-dessus, ces dommages sont dus principalement à des effets directs ou indirectes. Ainsi, dans la figure II.6, un récapitulatif sur certains effets des séismes est donné.

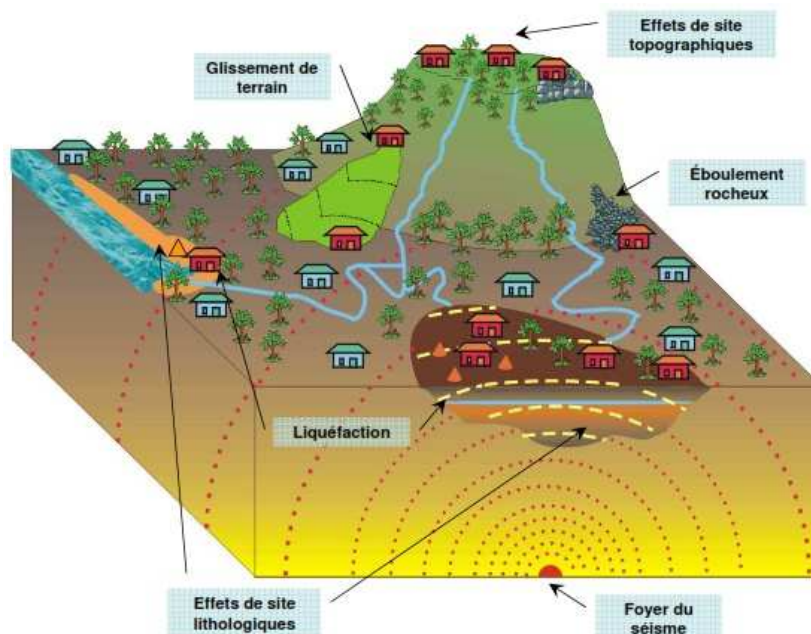


Figure II. 6. Les différents effets des séismes (Guettiche 2017).

II.4.2. Les effets directs

Les effets directs sont souvent responsables de la majeure partie des dégâts causés aux structures. Selon le rôle de chaque élément, des modes d'endommagement différents peuvent être constatés. À cet effet, une présentation de certains composants endommagés est donnée dans ce qui suit, par bloc d'éléments :

II.4.2.1. Dommages constatés sur les éléments structuraux

a- Dommages constatés sur l'élément poteau

D'après l'expertise effectuée par Davidovici (Davidovici 2003) sur les dégâts occasionnés par le séisme du 21 Mai 2003, Zemmouri, Boumerdes, une variété de dommages importants est constatée sur l'élément poteau. Parmi ces dommages, ceux exposés sur la figure II.7., font partie des modes d'endommagement les plus fréquents.



Figure II.7. Désordres enregistrés sur l'élément poteau (Davidovici 2003).

Suivant l'état de dommage présenté par la photo 3 de la figure II.7, il a été constaté que ces dégâts sont dus en grande partie à l'effet de l'espacement fixe entre les cardes du poteau, alors qu'ils doivent être espacés de 15 cm en partie courante et de 10 cm en zone nodale conformément au RPA 99. Dans la photo 2, il a été constaté que sur les poteaux de faible hauteur dits poteaux courts, l'endommagement est dû essentiellement à leurs cisaillements. Dans la photo 1, une mise à nu d'une grande partie des aciers du poteau est constatée, généralement, ce désordre est dû au flambement des aciers longitudinaux.

b- Dommages sur l'élément poutre

Selon le rapport d'expertise publié par l'AFPS (AFPS 2003) suite au séisme de 21 Mai 2003 à Zemmouri, Boumerdes, plusieurs états de dommages (plus au moins importants) ont été constatés sur l'élément poutre (figure II.8).



Figure II.8. Illustration de quelques dommages constatés sur l'élément poutre (AFPS 2003).

Après examen des poutres, l'équipe AFPS avait remarqué que la qualité du béton était très médiocre à cause des ségrégations dues à un manque de compacité lors du coulage et à de mauvaises reprises de bétonnage.

c- Dommages au voisinage du nœud

En se référant au rapport d'expertise Davidovici (Davidovici 2003), du séisme de 2003, à Zemmouri, Boumerdes, des modes d'endommagement particuliers ont été relevés à la jonction poteau-poutre.



Figure II.8. Dommages constatés sur les portiques (Davidovici 2003).

Tel qu'illustré sur la photo 6 de la figure ci-dessus, les auteurs ont constaté que l'endommagement du portique est forcément dû à l'absence des cadres au cœur du nœud. Aussi, de la photo 7, il a été constaté que du fait que la section des poteaux étant souvent équivalente à celle des poutres, la plastification des nœuds s'est produite en tête ou en pied de poteau.

d- Dommages sur le composant voile

Un voile est l'élément qui reprend la majeure partie de la sollicitation sismique. Par conséquent, une multitude de mode d'endommagement peuvent y apparaître (figure II.9).



Figure II.9. Dommages constatés sur l'élément voile (OFPP 2010).

La figure II.9 montre deux cas d'éclatement du béton s'étant produit à mi hauteur du voile, engendrant par conséquence une mise à nu de ses aciers.

II.4.2.2. Dommages constatés sur les éléments non-structuraux

a- Dommages sur l'élément murs en maçonnerie

Pratiquement dans toutes les structures endommagées par le séisme de 21 Mai 2003 Zemmouri, Boumerdes, les murs en maçonneries (intérieurs et extérieurs) ont subi d'important dommages (Davidovici 2003 ; AFPS 2003).



Figure II. 10. Dommages enregistrés pour les éléments de maçonnerie (Davidovici 2003).

Les photos 10 et 11 de la figure II.10 montrent que les murs en maçonneries n'ont pas servi de panneaux de contreventement, car ils étaient situés hors du plan de travail des portiques. Il n'y a donc pas eu d'interaction entre les panneaux et les poteaux contrairement à ce que l'on rencontre habituellement.

b- Damage constaté sur l'élément escalier

Selon le rapport d'expertise publié par (Hiroto Kato et al. 2010), de plus des dommages importants prélevés sur les éléments structuraux, des désordres importants ont été constatés sur les éléments non structuraux. Parmi ces derniers, l'élément escalier était le plus endommagé.



Figure II. 11. Dommages enregistrés pour l'élément escalier (Hiroto Kato et al. 2010).

La fissuration des éléments poutres supportant le palier de l'escalier extérieur (photo 13) et l'effondrement du mur de l'escalier extérieur (photo 12) étaient les deux modes d'endommagements les plus courants.

c- Damage constaté sur l'élément balcon

Selon le guide publié par l'OFPP (OFPP 2010), l'habitabilité des bâtiments ne dépend pas uniquement de l'état des éléments intérieurs. L'état des éléments extérieurs, tel que les balcons (figure II.12) doivent être pris en considération.



Figure II. 12. Dommages enregistrés pour l'élément Balcon (OFPP 2010).

II.5. Méthodes d'inspection des dommages.

Pour évaluer les dégâts post-sismiques et classer immédiatement les bâtiments qui nécessitent une réparation et/ou un renforcement et ceux qui sont irrémédiables, plusieurs stratégies sont proposées dans la littérature : les fiches d'évaluation, l'imagerie satellitaire, l'intelligence artificielle ... etc. Sachant que les autorités algériennes ont privilégié l'utilisation des deux premières méthodes, dans ce qui suit, seules ces deux approches sont présentées d'une manière détaillée.

II.5.1. Premier outil : Fiche d'évaluation des dommages

Ces fiches permettent de relever les dommages constatés sur les bâtiments, de donner une appréciation de la conformité parasismique (par conséquent, indiquant si oui ou non la construction peut être exploitée et avec quel degré de sécurité) et aussi d'indiquer les mesures d'urgence à entreprendre (étalement d'escalier, réparation toiture, enlèvement de faux-plafonds, de cheminées... etc.). En effet, en fonction du mode de construction, du matériau, ...etc., d'un pays à un autre, le détail du contenu de ces fiches diffère. Ainsi, parmi ces outils, nous pouvons citer :

II.5.1.1. Fiche d'inspection italienne – fiche AeDES

La fiche *AeDES* permet de relever les dommages constatés sur les bâtiments, de donner une appréciation de la conformité parasismique et d'indiquer les mesures de première urgence à entreprendre (étalement d'escalier, réparation de toiture, enlèvement de faux-plafonds, de cheminées...etc.). Pour cela, après chaque événement sismique, des équipes techniques spécialement entraînées, remplissent point par point cette fiche. Et aboutissent, par conséquent à l'une des conclusions données dans le Tableau II.1.

Tableau II.1. Conclusion possible suite à une évaluation avec *AeDES*.

Utilisable	Le bâtiment peut être utilisé sans mesures. Dommage mineur mais risque négligeable pour la vie humaine.
Utilisable avec contres mesures	Bâtiment endommagé mais pouvant être utilisé lorsque des contre-mesures à court terme sont prises.
Partiellement utilisable	Seule une partie du bâtiment peut être utilisée en toute sécurité.
Temporairement utilisable	Bâtiment à inspecter à nouveau. Inutilisable jusqu'à la nouvelle inspection.
Inutilisable	Le bâtiment ne peut pas être utilisé en raison des risques (structurels, non structurels ou géotechniques) élevés pour la vie humaine. Pas nécessairement un risque d'effondrement total.
Inutilisable avec risque externe	Le bâtiment pourrait être utilisé, mais il ne peut pas en raison du risque élevé causé par un facteur externe (bâtiment fortement endommagé adjacent ou faisant face au bâtiment, chutes de pierres, etc.)

Aussi, selon Baggio et al. (2007), en fonction des compétences de l'évaluateur, de son expérience, de l'importance des dégâts, ... etc., la durée d'inspection d'un bâtiment avec l'outil *AeDES* varie de 1 à 3 h,

II. 5.1.2. Fiche d'inspection des USA

Le guide ATC-20 fournit des procédures et des directives permettant de procéder à des évaluations sur place et de prendre des décisions concernant l'utilisation et l'occupation continues des bâtiments endommagés par le séisme. Rédigé spécifiquement pour les

ingénieurs en structure et les inspecteurs de bâtiments volontaires, de puis 1989, ce guide est devenu la norme nationale pour l'évaluation de la sécurité des bâtiments endommagés par des séismes. Le guide comprend des procédures d'évaluation rapides et détaillées pour l'inspection des bâtiments et leur affichage sous la forme :

- Sans danger, (affiche verte),
- Entrée limitée (affiche jaune) ou
- Inutilisable (affiche rouge).

Des procédures spéciales sont également incluses pour l'évaluation des bâtiments essentiels (par exemple, les hôpitaux, les écolesetc.),

À la suite de cinq séismes survenus depuis la publication initiale du guide ATC-20 en 1989, des modifications ont été apportées. Parmi-elles, on distingue : le remplacement de la carte d'affichage jaune (utilisation restreinte au lieu de limité), l'inclusion d'une procédure d'estimation des coûts de réparation, l'élargissement du champ d'application des procédures ATC, l'ajout de formulaire d'évaluation, l'actualisation des directives données sur le comportement humain.

II. 5.1.3. Fiche d'inspection Grec

En Grèce, la fiche d'inspection (*EDIF*) sur laquelle les ingénieurs - experts prélèvent les dommages, représente un outil de base pour effectuer de bonnes inspections et réaliser des évaluations fiables de la sécurité d'un bâtiment. Selon Anagnostopoulos et Moretti (2008), cette fiche a été préparée en tenant compte des objectifs suivants:

Avoir un guide pour les inspections rapides et détaillées. Lors de l'inspection, seules les cases verticales sont remplies, tandis que l'inspection détaillée comporte les cases verticales et horizontales.

N'inclure que les informations nécessaires sur la construction, de manière à pouvoir la remplir facilement, tout en fournissant aux autorités les données nécessaires.

Demander à l'ingénieur de vérifier toutes les informations nécessaires à une évaluation fiable. Des informations qui regroupent non seulement les dommages causés aux différents types d'éléments structuraux et non structuraux, mais également le type de système structural, l'existence ou non de murs de contreventement, ... etc.

Pour être explicite et inclure toutes les données nécessaires, telles que les catégories d'utilisation, les types structuraux et les explications sur la décision finale.

Dans le guide *EDIF*, ces informations sont fournies en six sections distinctes, à savoir :

Section A (emplacement du bâtiment) ;

Section B (Description du bâtiment) ;

Section C (Dommages) ;

Section D (Évaluation globale) ;

Section E (Pertes humaines) ;

Section F (mesures à prendre).

II. 5.1.4. Fiche d'inspection Turque

La fiche d'évaluation de dommages est proposée par le ministère des travaux publics et de la direction générale de la colonisation, responsable des catastrophes. D'après la description donnée par (Taskin et al. 2012), sur la face avant de la fiche, des informations administratives telles que l'adresse, des informations sur les occupants, l'année de construction, les coordonnées GPS (le cas échéant), le plan et la géométrie de l'habitat du bâtiment (bâtiment adjacent; géométrie du plan, etc.), le nombre d'étages, le but de l'usage, le nombre total d'unités indépendantes du bâtiment, le nombre total d'unités indépendantes résidentielles, commerciales, entrepôts, étables et greniers et le nombre de victimes dans chaque unité sont collectés.

Dans la deuxième section, des informations sur le système structurel sont rassemblées. Étant donné que cette fiche sert à la fois aux structures en maçonneries, en béton armé et aux bâtiments construits sans service d'ingénierie, pour chaque inspection, la typologie de la structure est indiquée et le système structurel des dalles et le type de toiture sont collectés.

Aussi une partie de cette section concerne les dommages structurels et non structurels observés, où l'inspecteur peut noter le code défini pour chaque degré de dommage (aucun; léger; modéré; lourd; effondrement). Enfin, une remarque d'évaluation générale et des commentaires supplémentaires sont notés dans les deux dernières colonnes du formulaire.

II. 5.1.5. Fiche d'inspection Japonaise

Au Japon, le guide d'évaluation des dommages est élaboré en 1991 (JBDPA 2001). L'objectif principal de cette fiche est de fournir des critères rationnels, lorsqu'un ingénieur doit identifier et évaluer de manière quantitative les dommages causés aux bâtiments, déterminer proposer les actions et les solutions techniquement fiables pour restaurer les bâtiments endommagés. Il décrit une base d'évaluation des dommages et des techniques de réhabilitation pour trois systèmes structurels typiques au Japon, à savoir les bâtiments en béton armé, en acier et en bois.

Ce guide d'inspection comprend trois sections principales:

- Indice de dommage des fondations et de la superstructure ; Les dommages de chaque élément de structure sont inspectés et classés de I à V. Ensuite, l'indice de capacité sismique résiduelle R est calculé et l'indice de dommage global du bâtiment est calculé en fonction de R .
- Détermination des actions de réhabilitation, sur la base du taux de dommages défini initialement et de l'intensité des secousses.
- Instructions visuelles pour la réparation et le renforcement. Environ 50 techniques sont illustrées avec les détails du renforcement recommandé et les procédures de réhabilitation.

II. 5.1.6. Fiche d'évaluation utilisée en Algérie

En Algérie, pour évaluer les dommages post-sismique, une procédure intuitive se basant principalement sur l'observation visuelle est utilisée. Cette démarche consiste à renseigner avec précision la fiche présentée sur la figure II.13.

Wilaya de Boumerdès							
Fiches d'évaluation des dommages							
séisme du 21 mai 2001							
code inspecteur :							
date :							
identification de la construction :							
R_c							
Secteur	zone	Construction calculée au séisme : oui non					
Adresse ou éléments d'identification		Construction contrôlée : oui non					
Usage de la construction(*)							
Logement		scolaire		commerciale			
Administratif		hospitalier		industriel			
Socioculturel		sportif		réservoir d'eau			
Autre (à préciser)							
Description sommaire							
R_c							
Age approximatif		vide sanitaire : oui non					
Nombre de niveaux		Sous-sol : oui non					
Nombre de joints de dilatation en elevation		élément extérieur indépendant					
infrastructure		(escalier, auvent, passage, couvert)					
Problème de sol autour de la construction							
Faïlle :	oui	non	affaissement	PSC	soulèvement	oui	non
Liquéfaction :	oui	non	glissement			oui	non
Fondation-infrastructure							
PSC							
Fondation				infrastructure (dans le cas VS ou S/SOL)			
Type de fondation :				voile béton continu 1 2 3 4 5			
Type de dommage :				poteaux béton avec remplissage 1 2 3 4 5			
Tassement uniforme : oui non							
Glissement : oui non							
Basculement : oui non							
Structure résistante							
PER							
Elément porteurs (charges verticales)				Elément de contreventement			
Murs en maçonnerie 1 2 3 4 5				Murs en maçonnerie 1 2 3 4 5			
Voile béton 1 2 3 4 5				Voile béton 1 2 3 4 5			
Poteau métallique DEP 1 2 3 4 5				Portiques béton armé 1 2 3 4 5			
Poteau bois 1 2 3 4 5				Portique métalliques 1 2 3 4 5			
Autre 1 2 3 4 5				Palées triangulées 1 2 3 4 5			
				Autre 1 2 3 4 5			
Plancher-toiture terrasse DEPTI				Toiture inclinée DETI			
Béton armé 1 2 3 4 5				Charpente métallique 1 2 3 4 5			
Solives métallique 1 2 3 4 5				Charpente bois 1 2 3 4 5			
Solive bois 1 2 3 4 5				Couverture tuile 1 2 3 4 5			
				Couverture amiante ciment 1 2 3 4 5			
				Couverture métallique 1 2 3 4 5			

Partie A.

Dans ce formulaire, une cinquantaine d'informations sont regroupées. Elles permettent de décrire l'état d'un ouvrage avec rigueur. Ainsi, parmi les informations données dans la partie (A), Nous retrouvons celles qui sont dites :

- D'ordres générales ; notées **R_I** pour l'inspecteur et **R_c** pour la construction.
- Concernant l'entourage de la construction (les problèmes liés aux sols **PSC**)
- Relatives à l'état des éléments Résistants **PER**.

Et parmi les informations renseignées sur la partie (B), nous pouvons citer celles qui sont :

- Relatives à l'état des éléments secondaires **PES**.
- Liées aux différents problèmes rencontrés sur les constructions adjacentes **PCA**.
- Reliées les différentes sources pathologiques probables des dommages, noté **PCI**.
- Relatives à l'évaluation globale des dommages subis par la construction, noté **D_G**.

<u>Elément secondaires</u> DES		PES	
<u>Escaliers</u> DEES		<u>Remplissages extérieurs</u> DERE	
Béton	1 2 3 4 5	Maçonnerie	1 2 3 4 5
Métal	1 2 3 4 5	Béton préfabriqué	1 2 3 4 5
Bois	1 2 3 4 5	Bardages	1 2 3 4 5
		Autres	1 2 3 4 5
<u>Autres éléments intérieurs</u> DEI		<u>Eléments extérieurs</u> DEE	
Plafonds	1 2 3 4 5	Balcons	1 2 3 4 5
Cloisons	1 2 3 4 5	Garde cops	1 2 3 4 5
Elément vitrés	1 2 3 4 5	Au vent	1 2 3 4 5
		Acrotère-corniche	1 2 3 4 5
		Autres	1 2 3 4 5
<u>Influence des constructions adjacentes</u>		PCA	
La construction menace une autre construction		oui	non
La construction est menacée par une autre construction		oui	non
La construction peut être soutien par une autre construction		oui	non
La construction peut être soutenu par une autre construction		oui	non
<u>Victimes</u>			
Oui – non – peut être		si oui combien ??	
<u>Commentaire sur la nature et la cause probable des dommage</u> PCI			
	<u>Sens transversal</u>		<u>Sens longitudinal</u>
Symétrie en plan	bon	moyen	mauvais
Régularité en élévation	bon	moyen	mauvais
Redondances des files	bon	moyen	mauvais
<u>Autres commentaires</u>			
<u>Evaluation finale</u>			
<u>Niveau général des dommages</u> D_G		<u>Couleur à utiliser</u>	
1 - 2 - 3 - 4 - 5		Vert-Orange-Rouge	
<u>Mesures immédiates à prendre :</u>			

Partie B.

Figure II.13. Guide utilisé par les autorités Algériennes pour l'évaluation des dommages après séisme (Bertero & Hareh1981; Boukri et al. 2014).

Cette fiche d'évaluation de dommages, a été proposée par le CTC dès 1980 (après le séisme d'El Asnam en 1980), pour ensuite être utilisée lors de différents séismes jusqu'à

l'année 2000, avant de subir des améliorations apportées par le CGS en 2003, après le tremblement de terre de Boumerdès (Belazougui 2008).

Cette procédure utilisée, considère une échelle de dommages de cinq niveaux (variant de D_1 à D_5), similaire à l'échelle de dommages donnée par l'EMS98 (Meslim et al. 2011).

Ainsi, concernant l'évaluation du niveau de dégâts des éléments de la construction (éléments structurels, éléments non structurels et système de fondation), celle-ci s'effectue selon cinq catégories de dommages, variant d'un niveau de dommage léger (noté D_1) à un niveau de dommage plus élevé (noté D_5).

Par contre, les éléments externes à la construction (défaillances au niveau du sol de la construction, des structures adjacentes), sont mentionnés par l'annotation « Non » dans le cas où la menace existe, et l'annotation « Oui » dans le cas contraire. Ces deux réponses représentent les deux bornes de l'échelle D_1 et D_5 .

Ensuite, en fonction des dommages observés sur les différents composants, une catégorie de dommage globale D_G sera attribuée à la structure, telle que :

$$D_G = f(D_{EP}, D_{EC}, D_{EPTT}, D_{ETI}, D_{E.ESC}, D_{E.RE}, D_{E.El}, D_{E.E}) ; D_G \in [D_1 \text{ à } D_5]$$

Selon le niveau de la catégorie de dommage D_G , chaque construction est marquée d'une couleur spécifique (Allali et al. 2018) :

Vert (niveaux 1 et 2): pour les constructions n'ayant subi aucun dommage (ou léger), et pouvant être réoccupé immédiatement.

Orange (niveaux 3 et 4): pour les constructions ayant subi des dégâts et nécessitant une seconde expertise étendue, qui permettra de décider si (et comment) ces constructions peuvent (ou ne peuvent pas) être réparées ou renforcées, en fonction de l'importance des coûts de réparation ou de renforcement.

Rouge (niveau 5): pour les constructions partiellement ou totalement effondrées.

II.5.1.7. Avantages et inconvénients de la première méthode d'inspection

a- Avantages

L'inspection visuelle basée sur la fiche d'inspection présente plusieurs avantages en particulier :

- De contribuer à la fiabilité du processus d'inspection des dommages en favorisant une meilleure uniformité,

- De présenter un guide d'inspection en langage naturel compréhensif par tous les évaluateurs,
- De mener une inspection individuelle et détaillée pour chaque structure,
- De faciliter la collecte de données correspondant aux informations recensées sur la structure et ses composants.

b- Inconvénients

Parallèlement aux avantages cités ci-dessus, nombreux désavantages peuvent découler de cette méthode, parmi eux:

- Un nombre d'expert variant relativement à la surface de la zone endommagée,
- Le remplissage de la fiche requière une bonne qualification dans le domaine d'inspection des dommages,
- L'importance du temps que prennent chaque inspection (environ 3 heures) par construction),
- La prise de décision selon le formulaire, peut varier d'un expert à un autre pour le même état de dommage c.-à-d. la même construction,
- La fiche ne comporte aucune indication sur le choix des catégories de dommages à associer pour le composant.

II.5.2. Deuxième méthode : Imagerie satellitaire

L'imagerie satellitaire est utilisée depuis longtemps dans le domaine de l'étude des risques naturels, principalement pour l'analyse des dégâts consécutifs à une catastrophe. En effet, diverses études ont été menées pour estimer les dommages consécutifs aux catastrophes naturelles, notamment les inondations, les cyclones ou encore les mouvements de terrain (Marinelli et al. 1997 ; Wood 2002). Les résolutions spatiales ne permettaient pas avant l'année 1999, une estimation fiable des dégâts en raison de la taille trop importante du pixel par rapport aux éléments endommagés par le séisme (tels que bâtiments ou autres structures). En effet, la plus haute résolution disponible jusqu'à la fin des années 90 était de 5 mètres, en mode panchromatique (noir & blanc), du satellite indien *IRS*, suivie par celle de 10 mètres des satellites français *SPOT 1-4*. Ainsi, seules les zones complètement détruites ont pu être détectées et cartographiées par télédétection, notamment suite au séisme de Kocaeli, en Turquie, survenu en août 1999. Avec l'arrivée d'une nouvelle génération de satellites tels qu'*IKONOS* en 1999, *EROS A1* en 2000 ou *Quickbird* en 2001, dont les images ont des résolutions spatiales allant de 1,8 à 0,60

mètres, l'imagerie a commencé à être utilisée comme un outil performant dans le domaine du génie parasismique.

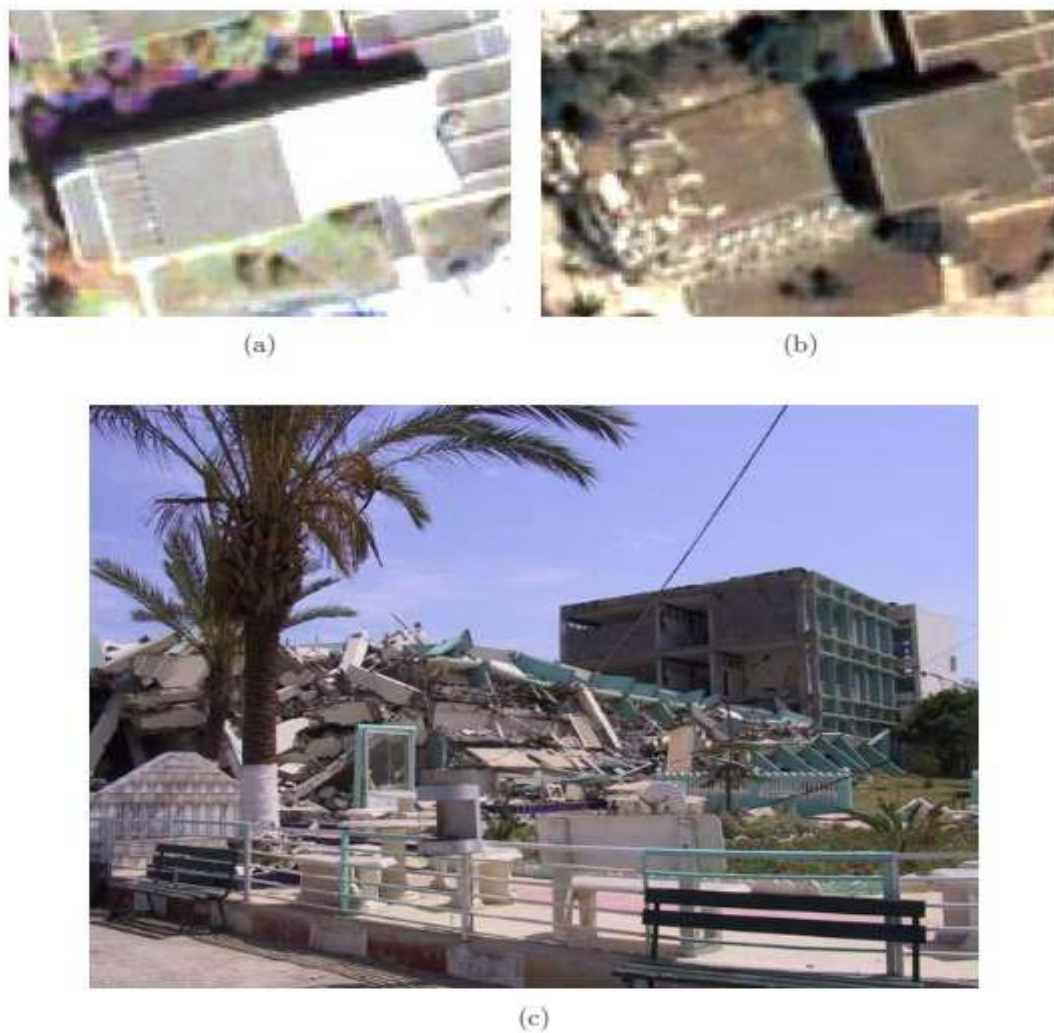
IKONOS est le premier satellite optique civil à haute résolution, avec une résolution spatiale maximale de 1,0 m, en opération depuis 1999. Il a permis de capturer une image nette de la région de Bhuj après le tremblement de terre du 26 janvier 2001 à Gujarat, en Inde. Saito et al. (2004) ont effectué une inspection visuelle des dommages en utilisant les images post-événement issues du satellite *IKONOS*. Après cet événement, de nombreuses autres images ont été prises avec le satellite *IKONOS* dans les zones touchées par les séismes (Chiroiu et al., 2005).

QUICKBIRD est le satellite optique à haute résolution le plus utilisé depuis sa mise en service en 2001. Ce succès est la conséquence de la qualité de sa résolution spatiale, avec une maximale de 0.6 mètre. Selon Yamazaki et al. (2004), le premier couple d'images avant et après événement de *Quickbird* a été pris pour l'identification des zones les plus touchées par le tremblement de terre du 21 mai 2003 à Boumerdes, en Algérie. Les images *QuickBird* ont été utilisées également pour détecter les zones touchées par le tremblement de terre de Bam, en Iran, en 2003 (Rathje et al., 2005; Saito et al., 2005; Yamazaki et al., 2005), le séisme de 2006 en Java, en Indonésie (Yamazaki & Matsuoka, 2007), et de nombreuses autres catastrophes (Adams & Eguchi, 2008).

En général, pour la détection visuelle à partir d'images verticales, les dommages peuvent être détectés par plusieurs indications, à savoir, en observant l'absence ou la diminution des ombres, les irrégularités géométriques des contours et l'hétérogénéité des toits. Par conséquent, les structures dont le niveau de dommage est de (D_1), de (D_2) et certaines de (D_3) ne peuvent pas être détectées à partir d'images *QuickBird*. Aussi, les dommages non structurels ne peuvent pas être identifiés à partir d'images verticales.

II.5.2.1. Utilisation de l'imagerie satellitaire dans le cas du bâti Algérien

Après le séisme de Boumerdes, 2 794 bâtiments (y compris les maisons) ont été évalués en utilisant des images *QuickBird*. Sur la base de l'interprétation donnée ci-dessus, ces bâtiments ont été divisés en groupes de 2526; 169; 35; et 64 pour les grades D_1 et D_2 ; D_3 ; D_4 ; et D_5 , respectivement. Un exemple est illustré à la figure II.14, où un bâtiment totalement effondré et entouré de débris a été facilement détecté.



(a) l'image QuickBird pré-événement, (b) l'image QuickBird post-événement
(c) une photo prise du sol.

Figure II.14. Un bâtiment effondré par le séisme de Boumerdes (Mesleme et al. 2011).

Les images a et b obtenues par le satellite *QuickBird*, représentent l'état de la structure avant et après le passage du séisme. Suivant les résultats issus de la comparaison entre ces images, la structure a été classée en D₅. Cette figure a permis à Mesleme et al. de constater que pour un tel état de dommages les inspections visuelles utilisant des images *QuickBird* sont d'une grande précision.

La figure II. 15, montre un autre exemple ; un bâtiment de cinq étages légèrement incliné et sans débris environnant.



(a) l'image QuickBird pré-événement, (b) l'image QuickBird post-événement
(c) une photo prise du sol.

Figure II.15. Un bâtiment de 4 étages qui a subi des dommages légers (Mesleme et al. 2011).

Suivant les résultats issus de la comparaison entre les images (a) et (b), la structure a été classée en D₄. Ces images représentent l'état de la construction avant et après séisme, respectivement.

Par contre la figure II.16, montre le même type de bâtiment, mais fortement incliné et entouré de débris; la précision de détection visuelle pour cette structure était bonne même lorsque seule l'image post-événement était utilisée.



(a) l'image QuickBird pré-événement, (b) l'image QuickBird post-événement
(c) une photo prise du sol

Figure II.16. Détection des dommages avec précision un bâtiment fortement incliné (Mesleme et al. 2011).

Suivant l'état de dommage illustré à la figure II.16., le bâtiment a été classé en D₅ (à évacuer) après analyse des résultats donnés par le satellite *QueckBrid*. Selon (Mesleme et al. 2011) pour ce cas de dommages la structure peut être classée en se référant uniquement à l'image post-événement.

Cependant, pour certains bâtiments fortement endommagés et entourés de débris, il était difficile de détecter les dommages en utilisant uniquement des images post-événement car les débris étaient cachés par leur ombre (figure II.17).



Figure II.17. Un cas où il est difficile de voir de gros dégâts en utilisant uniquement l'image post-événement; les débris entourant les bâtiments sont cachés par l'ombre (Mesleme et al. 2011).

En utilisant uniquement l'imagerie satellitaire, la détermination exacte de l'état de dommage illustré à la figure II.17, est très difficile. Cette observation explique pourquoi le pourcentage de dommages mal évalués pour les bâtiments de hauteur moyenne de 3 et 4 niveaux est élevé.

La figure II.18 montre un exemple de bâtiment de 4 étages, issu de l'enquête sur le terrain, classé en D₄ par l'enquête et jugé incorrectement entre D₁ et D₂ par détection visuelle.



Figure II.18. Un bâtiment de quatre étages ayant subi des dommages légers (Meselem et al. 2011).

II.5.2.2. Avantages et inconvénients de l'imagerie satellitaire

a- Avantages de l'IS

L'inspection visuelle basée sur l'imagerie satellitaire présente plusieurs avantages en particulier :

- Le nombre d'expert demandé pour l'exécution de la tâche est très restreint,
- L'exécution de la tâche se fait en des temps vraiment très courts,
- La simplification de l'interprétation des états de dommages,
- Moyen très efficace et plus simple pour cartographier les dommages,
- Adaptable sur toutes les structures et toutes les régions.

b- Inconvénients de l'IS

Malgré l'avancée technologique effectuée durant ces dernières décennies, certain inconvénient apparaissent :

- Les structures dont le niveau de dommage D_1 , de D_2 et certaines des structures de D_3 ne peuvent pas être détectées à partir d'images satellitaires,
- Les dommages non structurels (des éléments secondaires) ne peuvent pas être identifiés à partir d'images satellitaires,
- Souvent l'utilisation de cette méthode induit une réduction dans l'échelle de classification de dommages,
- Une méthode qui ne peut être exploitée que par un nombre très limité d'ingénieurs.
- L'identification des dommages ne peut être effectuée que durant le jour, puisque elle se base essentiellement sur l'ombre de la construction et sur l'apparition de débris le long de son contour,
- Les résultats obtenus sur les bâtiments ayant de graves dommages internes sont peu fiables.

Partie B : Travaux réalisés sur les méthodes d'inspection des dommages post-sismiques.

En 1989, l'ATC-20 (Applied Technology Council) a développé un guide à l'intention des propriétaires et des occupants des bâtiments endommagés. Des conseils sont fournis pour répondre à un bon nombre de questions. Ces dernières surviennent pendant la période de rétablissement, après le tremblement de terre. Les questions abordées comprennent: (1) le processus d'évaluation de la sûreté et la signification de chacun des trois postes d'évaluation de la sécurité; (2) le processus de sécurisation des services pour effectuer les réparations; (3) comment obtenir de l'aide des organismes d'aide en cas de catastrophe.

En 2004, Saito et al., après le tremblement de terre du 26 janvier 2001 à Gujarat, ont procédé à une inspection visuelle des dommages à l'aide d'images post-événements obtenues avec le satellite *Ikonos*. Aussi, en utilisant le même satellite, **en 2005, Chiroiu et al.**, ont inspecté les dommages de ce même séisme, en comparant les images d'avant et après séisme, des zones touchées.

En 2005, Yamazaki et al., ont évalué les dommages causés par le tremblement de terre de 21 Mai 2003 à Boumerdes, en utilisant le couple d'image d'avant et après événement. Ces images ont été développées avec le satellite optique haute résolution *QuickBird* avec

une résolution spatiale maximale de 0,6 m. Aussi, **en 2005, Saito et al. & Rathje et al.**, ont utilisé les images issues de ce même satellite pour détecter les zones endommagées lors du tremblement de terre de Bam, en Iran, en 2003.

En 2005, Schweier C. & Markus M., ont proposé une autre méthode dite *balayage laser aéroporté*, offrant la possibilité de remplir la tâche d'inspection des dommages post-sismique. Sur la base de mesures de hauteur, cette technologie permet de générer des modèles géométriques de surface de bâtiments. Il est possible de comparer les structures antérieures à l'événement (non endommagés), avec celles enregistrées après séisme, la localisation des bâtiments effondrés ainsi que la dimension et les caractéristiques de leurs dommages. Vu que les échelles de classifications de dommages existantes ne répondent pas aux exigences de cette nouvelle technique, ces mêmes auteurs ont développé un nouveau catalogue de classification des dommages.

En 2007, Baggio et al., ont développé un guide d'évaluation des structures endommagées en Italie. Ce manuel est subdivisé en deux grandes parties, la première est réservée à l'inspection des structures avant séisme c.-à-d. à l'identification des structures vulnérables, et la seconde est réservée à l'évaluation des dommages post-sismique. Dans cette seconde partie, deux méthodes ont été proposées, la première correspond au développement d'une méthode globale à la portée du grand public, tandis que dans la seconde, une mise en œuvre d'un outil plus détaillé qui ne peut être employé que par un expert du domaine est effectuée. Aussi, l'élaboration de ces guides est réalisée suivant deux échelles de classification de dommages différentes, respectivement, décomposées en trois et cinq catégories de dommages.

En 2008, Sextos et al., ont mis en œuvre une méthode d'évaluation des bâtiments assistée par ordinateur avant et après les séismes. Cette méthode implique la compilation de bases de données, la visualisation SIG et la transmission de données mobiles. Son développement est basé sur les procédures de contrôle visuelles utilisées aux États-Unis et l'expérience passée en matière d'évaluation sismique de bâtiments en Grèce et en Turquie. La méthodologie proposée et le système informatique développé sont ensuite appliqués à la ville de Düzce en Turquie, une ville fortement endommagée par le tremblement de terre de 1999.

En 2009, Okada & Takai., ont mis en œuvre une échelle de classifications de dommages des constructions plus détaillée. Ainsi, afin d'aider les enquêteurs à classer les bâtiments endommagés sans erreur grossière, dans cette étude, un nouveau tableau

permettant de classifier les dégâts occasionnés aux composants (structuraux et non-structuraux) est proposé.

En 2010, Brunner D, et al., ont utilisé la méthode dite d'imagerie radar à synthèse d'ouverture notée SAR (Synthetic Aperture Radar) dans l'objectif d'accéder à des renseignements sur les zones touchées. Ainsi, ils ont pu cartographier les régions touchées avec une précision élevée.

En 2010, Carenno et al., ont proposé un outil informatique orienté vers l'aide à l'évaluation de dommages et la sécurité des bâtiments après des séismes importants. Le développement de ce système repose essentiellement sur deux théories de l'intelligence artificielle, la première correspond à celle des réseaux de neurones (de type artificiel à trois couches) et la deuxième correspond à une autre théorie mathématique dite Logique Floue.

En 2016, Hai Liu et al., ont développé un système radar polarimétrique permettant de détecter les charpentes en bois endommagées par les tremblements de terre. Ce système utilise un réseau constitué de quatre antennes Vivaldi à polarisation linéaire, enregistrant des échos de radar polarimétriques complets, dans une bande ultra large allant de 1 à 20 GHz. La conception détaillée du système et les algorithmes de traitement du signal pour une imagerie 3D haute résolution ont été présentés.

En 2017, Di Ludovico et al., ont développé une nouvelle technique d'inspection des dommages après séisme afin de minimiser l'impact des pertes sur les citoyens le plus rapidement possible. L'implication de l'outil *ReLUIS* dans la gestion du récent tremblement de terre (séisme d'Aquila en Avril 2009) a montré l'importance de son rôle clé dans l'inspection des dommages post-sismique.

En 2017, Nouari et al., ont proposé une méthode pour l'évaluation des dommages post-séisme. Cette méthode se base sur la théorie de réseaux de neurones artificiels (ANN). Pour se faire, deux groupes de paramètres directeurs sont pris en compte: le groupe de composants principaux et le groupe de composants secondaires. Pour sélectionner l'ANN adéquat au cas étudié, les auteurs ont procédé à un traitement de données (un ensemble de 3 614 bâtiments endommagés) issues de l'enquête post-séisme réalisée par le personnel technique qualifié. Cette analyse consiste à sélectionner : la meilleure combinaison de dommages des composants qui régit les dommages globaux des bâtiments; les paramètres du réseau neuronal, à savoir le nombre de couches et de neurones cachés, ainsi que les fonctions d'activation.

En 2018, Allali et al., ont développé une méthodologie basée sur la logique floue pour l'évaluation des dommages causés aux bâtiments après séisme. Cette méthode est développée afin d'améliorer la procédure d'évaluation des dommages existante. Ces améliorations résident dans la quantification du niveau de dommage global qui devrait être proportionnel à l'état de dommage de ses éléments principaux et secondaires. Cette méthode permet aux gestionnaires de crise sismique de déduire la véritable catégorie de dommages de chaque bâtiment.

II.6. Conclusions

À l'issu des caractères imprévisible et violent des séismes et du fait qu'un grand nombre de dommages peuvent se manifester, l'inspection de ces derniers est souvent l'une des tâches les plus difficiles lors de la gestion de crise sismique.

De ce fait, pour aboutir à une gestion meilleure de ces situations, l'utilisation de l'une des stratégies d'inspections de dommages présentées dans le présent chapitre est un fait indispensable. Toutes ces techniques représentent une avancée technologique importante dans ce domaine, et leurs applications représentent un succès auprès des responsables de la gestion post-événement. Néanmoins, de nombreuses difficultés peuvent surgir pendant l'exécution de cette tâche, engendrant en conséquence des classifications subjectives. Parmi ces conflits, on peut citer, d'une part, celles qui sont liées à l'inadéquation de la catégorie de dommage global avec l'importance des désordres recensés sur les différents composants structuraux et non structuraux. Et d'autre part, celles qui sont en relation directe avec le fait qu'aucune valeur seuil n'est définie rigoureusement entre deux catégories de dommages successives.

Compte tenu de ces insuffisances, des modèles mathématiques permettant de quantifier le niveau de dommage local et global seront développés dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Méthode des Plans d'Expériences présentation et application

Sommaire du chapitre III

III.1. Introduction	- 39 -
Partie A : Présentation de la Méthode des Plans d'Expériences	- 39 -
III.2. Contexte des plans d'expériences	- 39 -
III.3. Objectifs d'utilisation de la Méthode des Plans d'Expériences (MPE)	- 40 -
III.3.1. Les plans de criblages ou screening	- 40 -
III.3.2. Les plans de surface de réponse	- 40 -
III.4 Quelques notions sur la MPE	- 41 -
III.4.1 Notions d'espace expérimental	- 41 -
III.4.2 Coordonnées centrées réduites	- 42 -
III.4.2.1 Changement de l'unité de mesure	- 42 -
III.4.2.2 Déplacement de l'origine des mesures	- 42 -
III.4.3 Domaine d'étude	- 43 -
III.4.4 Notion sur la représentation des plans d'expérimentation	- 43 -
III.4.4.1 Représentation géométrique	- 43 -
III.4.4.2 Représentation matricielle	- 44 -
III.4.5 Notions de modélisation mathématique	- 44 -
III.4.6 Système d'équations	- 45 -
III.5 Différents plans d'expériences existants	- 46 -
III.5.1 Plan factoriel complet (PFC)	- 46 -
III.5.2 Plan factoriel fractionné	- 47 -
III.5.3 Plan Rechtschaffner	- 47 -
III.5.4 Plans de Plackett et Burman	- 47 -
III.5.5 Plans de Kishal	- 48 -
III.5.6 Tables de Taguchi	- 48 -
III.6 Conclusions	- 48 -
Partie B : application de la méthode PFC, pour une estimation quantitative du degré de dommage local et global.	- 49 -
III.7 Application des plans factoriels complets pour l'estimation du niveau de dommage local	- 49 -
III.7.1 Partie éléments résistants <i>PER</i>	- 49 -
III.7.1.1 Construction du plan	- 50 -
III.7.1.2 Représentation sous forme de tableau	- 50 -
III.7.1.3 Traitement des données	- 51 -
a- Représentation graphique des effets principaux	- 54 -
b- Représentation graphique des interactions du premier ordre	- 55 -
c- Représentation graphique des interactions d'ordres supérieures	- 56 -
III.7.2 Modèle d'estimation de la grandeur reflétant l'état d'ensemble des éléments non-structuraux D_{ENR}	- 57 -
III.7.2.1 Calcul des inconnus du modèle	- 58 -
III.7.2.2 Identification des paramètres (facteurs et interactions) influents sur la variation de la réponse	- 59 -
D_{ENR}	- 59 -
III.7.2.3 Représentation graphique des effets des éléments secondaires et de leurs interactions	- 60 -
a- Représentation graphique des effets principaux	- 60 -
b- Représentation graphique des interactions du premier ordre	- 61 -
c- Représentation graphique des interactions d'ordres supérieure	- 62 -
III.7.3 Application du PFC pour l'estimation du dommage global	- 63 -
III.7.3.1 Constructions du PFC dans le cas de l'évaluation des dommages globaux	- 64 -

III.7.3.2. Présentations des résultats	- 64 -
III.7.3.3. Calcul des coefficients	- 65 -
a- Développement du coefficient relatif au facteur D_{ER}	- 65 -
b- Développement du coefficient relatif au facteur D_{ENS}	- 66 -
c- Développement du coefficient relatif à l'interaction D_{ER} - D_{ENR}	- 67 -
III.7.3.4. Signification des effets	- 68 -
a- Signification du coefficient attribué au facteur D_{ER}	- 68 -
b- Signification du coefficient attribué au facteur D_{ER}	- 68 -
c- Signification du coefficient C_{21}	- 69 -
III.8. Comparaison des dommages globaux	- 70 -
III.9. Conclusions	- 71 -

III.1. Introduction

Cette partie de la thèse, scindée en deux parties, s'articule autour d'une approche statistique, dite théorie des plans d'expérience. Dans un premier temps, une brève présentation de la méthode des plans d'expériences (MPE) est effectuée, suivie d'une présentation plus détaillée du plan de type factoriel complet. Dans un second temps, la mise en application de cette théorie est effectuée. Pour ce faire, le traitement d'une banque de données composée de 7 890 fiches d'expertises (recueillis par le CGS et le CTC après le séisme de Boumerdes) a été réalisé suivant la théorie des plans factoriels complets. Ainsi, trois modèles mathématiques sont développés. Ils permettent d'une part, de quantifier les grandeurs reflétant l'état d'ensemble des éléments structuraux D_{ER} et celle des éléments non-structuraux D_{ENR} , et d'une autre part, de quantifier l'état de dommage global D_G en fonction des dommages relevés sur les différents composants. Enfin, une comparaison entre quelques résultats estimés par le modèle global et ceux attribués par l'investigateur est réalisée, après ajustement effectué, en se référant à la théorie d'analyse de la variance ANOVA « ANalyse Of VAriance ». Au final, trois modèles mathématiques sont proposés afin d'estimer le niveau de dommage d'une structure.

Partie A : Présentation de la Méthode des Plans d'Expériences

III.2. Contexte des plans d'expériences

Selon Montgomery (1997), le contexte d'utilisation des plans d'expérience recouvre les phénomènes de type «boîte noire» que l'on cherche à éclaircir pour mieux en comprendre le fonctionnement et en optimiser les performances. Cela impose une connaissance minimale sur le phénomène étudié avant d'entreprendre les essais. Cette théorie, permet de lister les paramètres qui peuvent avoir, ou supposés avoir, une influence sur le phénomène étudié c.-à-d. le fonctionnement de la boîte noire. Ces paramètres sont les «entrées» appelées par la suite facteurs ou variables (Montgomery 1997; Telforda 2007). Les performances obtenues sont les «sorties» appelées par la suite réponses, qui peuvent correspondre à toute manifestation ou conséquence d'un phénomène (Montgomery 1997; Telforda 2007).

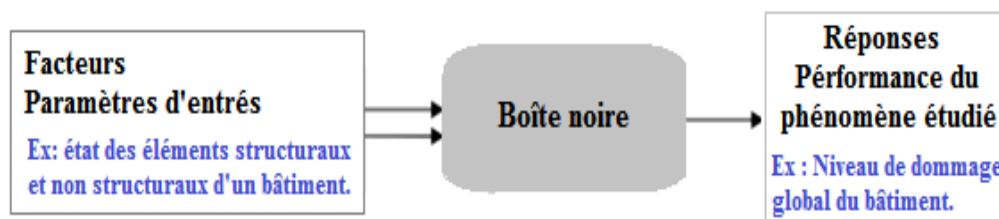


Figure III.1. Contexte d'utilisation des plans d'expériences.

L'objectif est de chercher à expliquer le fonctionnement de la boîte noire en estimant les réponses pour des combinaisons non réalisées, à partir des résultats d'essais et / ou de simulations effectués (Goupy & Creighton 2006).

III.3. Objectifs d'utilisation de la Méthode des Plans d'Expériences (MPE)

La méthode des plans d'expériences peut être utilisée dans deux types d'approches (Goupy 1990) :

- Les études de criblage ou screening,
- Les études de surface de réponse (MSR).

III.3.1. Les plans de criblages ou screening

La première famille de problèmes auxquels les plans d'expériences peuvent apporter une aide concerne les plans dits de criblage ou screening. Ces plans concernent la compréhension de l'effet des facteurs qui affectent le processus (Vial & Jardy 1998). Cette technique permet de déterminer, parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur les variations de la réponse (Kaid-Ameur & Hebbar 2015). Ainsi, implicitement, l'expérimentateur procède à une simplification du problème, en répondant aux questions suivantes : pourquoi la réponse varie? Et en fonction de quels facteurs?. Cette phase d'identification a pour but de limiter le nombre de facteur en vue d'une étude de surface de réponse (Schimmerling et al. 1998).

Pour illustrer cette technique, selon Maskri et al. (2009), les lecteurs peuvent se référer à l'étude menée par Sriniv-asaiah en 2004 (Sriniv-asaiah 2004). Dans ce travail, l'auteur utilise un plan en 28 essais, proposé par Plackett & Burman et identifie 10 facteurs ayant une influence significative sur le comportement du CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor) étudié parmi un ensemble de 21 facteurs potentiellement influents.

III.3.2. Les plans de surface de réponse

La méthodologie des surfaces de réponse MSR constitue le second volet de la méthode des plans d'expériences. Cette technique vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significatifs (Goupy 1999). Souvent, la MSR vient s'appliquer à la suite de l'étude de *Screening*, puisque logiquement, elle n'utilise que les facteurs précédemment jugés influents (Tebbiche et al. 2014). L'objet « surface de réponse » devient alors un support de connaissances, à partir duquel une étude plus complète de la fonction réponse peut être menée. Aussi, d'autres

auteurs (Vivier et al. 2007) ont définis la MSR comme un ensemble d'outils permettant la compréhension et l'exploitation d'objets simplificateurs de la fonction réponse étudiée.

III.4. Quelques notions sur la MPE

III.4.1. Notions d'espace expérimental

Dans leurs études, les expérimentateurs s'intéressent à la grandeur « réponse » qu'ils mesurent à chaque essai, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette dernière dépend d'un ou de plusieurs facteurs (Dagnelie 2000 ; Flory-celini & Virgone 2008). Aussi, la valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée « niveau ». Et souvent, lorsque l'influence d'un facteur est étudiée, sa variation est limitée par deux bornes.

- La borne inférieure dite aussi le niveau bas est notée N_b .
- La borne supérieure dite aussi niveau haut est notée N_h .

La variation de chaque facteur peut être représentée par un axe gradué et orienté, ainsi un exemple sur la définition du domaine de variation d'un facteur est illustré dans la figure III.2.

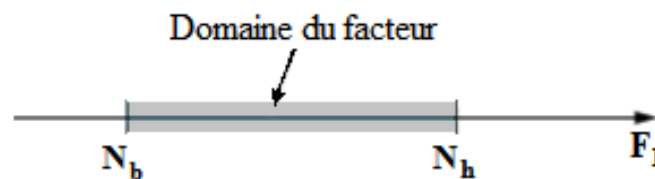


Figure III.2. Domaine de variation d'un facteur (Goupy 1999).

L'ensemble des valeurs que peut prendre le facteur « F_1 » entre N_b et N_h , s'appelle le *domaine de variation du facteur* ou plus simplement le domaine du facteur « F_1 ».

Dans le cas où un autre facteur « F_2 » influe la variation de la réponse, il sera représenté lui aussi par un axe gradué et orienté. Ainsi, comme pour le premier facteur, ce dernier permettra d'illustrer, son niveau haut noté par N_h' , son niveau bas noté par N_b' et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. De ce fait, tel que présenté par la figure III.3, un repère cartésien décrivant un espace euclidien à deux dimensions a été obtenu. Cet espace est appelé *l'espace expérimental*.

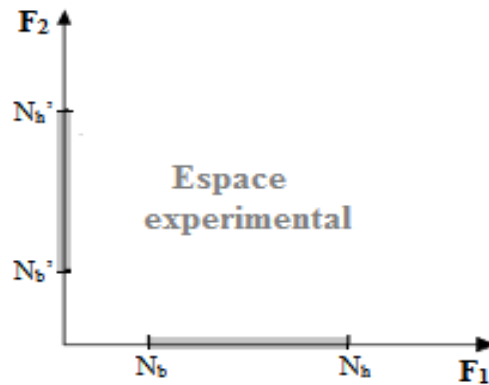


Figure III.3. Représentation de l'espace expérimental (Goupy & Creighton 2006).

III.4.2. Coordonnées centrées réduites

Dans l'intérêt de généraliser l'application de cette théorie et d'uniformiser sa présentations quels que soient le domaine d'étude et quels que soient la nature des facteurs, deux modifications doivent être effectuées. Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables appelées Variables Centrées Réduites (V.C.R.) ; centrées pour indiquer le changement d'origine, et réduites pour signaler la nouvelle unité (Srinivasaiah 2004).

III.4.2.1. Changement de l'unité de mesure

Les deux bornes de l'espace expérimental, à savoir le niveau bas et le niveau haut seront définis par les valeurs -1 et +1 respectivement (Tinsson 2010).

III.4.2.2. Déplacement de l'origine des mesures

En prenant en considération les nouvelles unités de mesures, une origine autre que celle exprimée en unité courante doit être présentée. Dans cette perspective, la nouvelle origine peut être représentée par le milieu de l'intervalle [-1, +1] (Droesbeke et al. 1997).

Le passage des variables d'origine aux variables V.C.R. est donné par la formule suivante:

$$X = \frac{A - A_0}{pas} \quad (\text{III.1})$$

Où les grandeurs X, A et A_0 représente respectivement la variable centrée réduite, la variable d'origine et la valeur centrale en unité courante.

Les variables codées résultent du rapport de deux grandeurs de même unité physique, elles sont donc sans dimension. La disparition des unités naturelles associées au fait que

tous les facteurs ont le même domaine de variation (deux unités codées), permettant ainsi la comparaison directe des effets des facteurs entre eux (Van den brakel 2013).

III.4.3. Domaine d'étude

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est dite *le domaine d'étude*. Ce dernier est défini par les niveaux hauts et bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs (figure III.4).

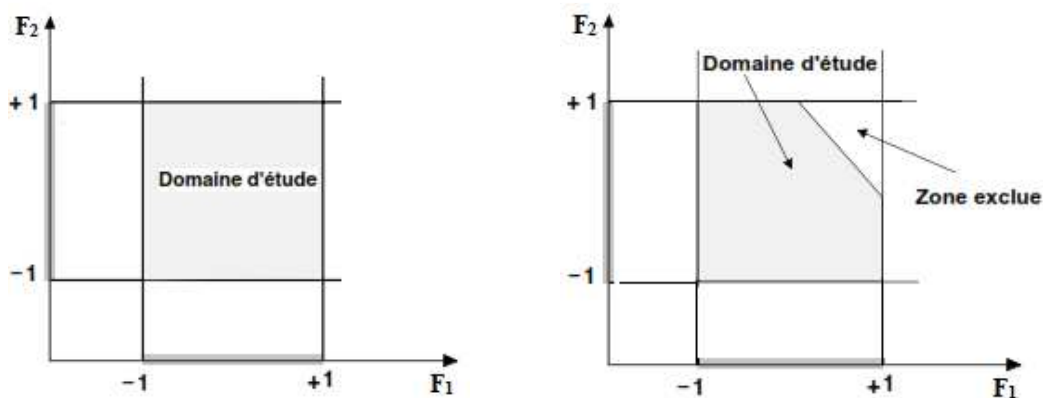


Figure III.4. Domaine d'étude défini par l'union des domaines des différents facteurs (Goupy & Creighton 2006).

Dans le cas où des contraintes se manifestent sur le domaine d'étude, une réduction de celui-ci est ainsi envisageable c.-à-d. une zone du domaine d'étude initial est mise à l'écart par l'expérimentateur tel que représenté à gauche de la figure III.4.

III.4.4. Notion sur la représentation des plans d'expérimentation

Le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental de cette méthode. Pour répondre à ces problèmes, deux techniques ont été proposées dans la littérature (Droesbeke et al. 1997 ; Tinsson 2010) ; la première, principale dite géométrique et la seconde, équivalente à celle-ci est dite matricielle.

III.4.4.1. Représentation géométrique

Le meilleur emplacement des points expérimentaux se situe aux sommets du carré définissant le domaine d'étude. Chaque point de ce domaine représente des conditions opératoires possibles, donc une expérience que l'opérateur pourrait réaliser (Telforda 2007). La disposition des points expérimentaux qui tient compte des propriétés mathématiques et statistiques existantes entre la réponse et les deux paramètres est donnée à la figure III.5.

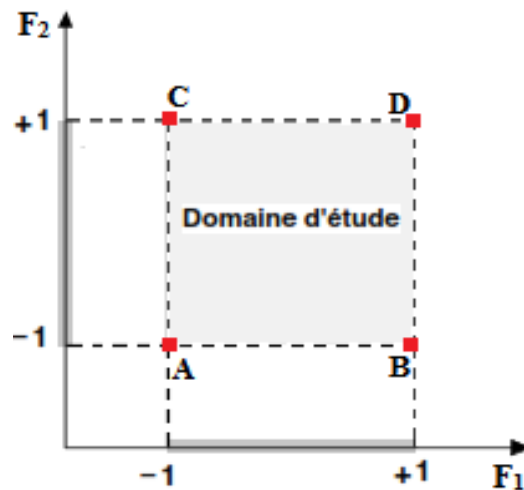


Figure III.5. Représentation géométrique d'un plan à deux facteurs (Tinsson 2010).

Dès que le nombre de facteurs est supérieur à trois, cette méthode de représentation ne peut plus être employée. De ce fait, pour les espaces multidimensionnels, la représentation matricielle est recommandée.

III.4.4.2. Représentation matricielle

La représentation matricielle équivalente à la disposition donnée à la figure III.5 est présentée dans le tableau III.1.

Tableau III.1.Représentation matricielle d'un plan à deux facteurs.

Configurations	F1	F2	Point correspondant
1	-1	-1	A
2	+1	-1	B
3	-1	+1	C
4	+1	+1	D

D'une manière générale, la construction de ces matrices se fait selon le principe suivant :

La colonne du 1^{er} facteur est une suite alternée des valeurs -1 et +1 (qui commence par -1), la colonne du 2^{ème} facteur est une suite alternée de deux valeurs de -1 suivis de deux valeurs de +1 et la N^{ième} colonne est une suite de 2^{N-1} valeurs de -1 suivis de 2^{N-1} valeurs de +1 (Goupy 1990).

III.4.5. Notions de modélisation mathématique

Dans le cas d'une étude ayant pour but d'estimer le poids des variables, la modélisation polynomiale est recommandée (Goupy 2000 ; Chlela 2008). Cette étape revient à choisir

une forme du modèle adaptée aux objectifs de l'étude et à estimer le nombre d'inconnues p associées au modèle :

Adopter un modèle additif sans interactions pour estimer et comparer les effets moyens des facteurs :

$$Y = C^{te} + \sum_{i=1}^k W_i \text{ et } p = 1 + \sum (m_i - 1) \quad (\text{III.2})$$

Adopter un modèle additif avec interactions pour préciser les effets moyens des facteurs par des interactions :

$$Y = C^{te} + \sum_{i=1}^p W_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k C_{ij} \text{ et } p = 1 + \sum_{i=1}^k (m_i - 1) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^{k-1} (m_i - 1)(m_j - 1) \quad (\text{III.3})$$

Dans les relations III.2 et III.3 :

m_i désigne le nombre de modalités du facteur i ,

k désigne le nombre de facteurs considérés,

W_i désigne le poids du facteur i

C_{ij} désigne le poids de l'interaction entre les facteurs i et j .

III.4.6. Système d'équations

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues à déterminer. Au terme de la MPE, un système de n équations (n essais) à p inconnues (p coefficients) est obtenu. L'écriture simplifiée de ce système peut être représentée par la notation matricielle donnée par l'équation (III. 4) :

$$y = X a + e \quad (\text{III.4})$$

Avec : y : vecteur des réponses, X : matrice de calcul ou matrice du modèle, a : vecteur des coefficients et e : vecteur des écarts.

Remarque : La dimension de la matrice du modèle dépend essentiellement : des points expérimentaux choisis et du modèle mathématique retenu.

Pour résoudre ce système d'équations (équation III.4), la méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés est utilisée. En conséquence, cette résolution aboutie au développement de la relation (III.5), qui permet d'estimer les différents coefficients (inconnus du modèle) notés par le vecteur $\hat{a}$.

$$\hat{a} = (X'X)^{-1} X' * y \quad (\text{III.5})$$

Où : X et X' représentent respectivement la matrice de Fisher et sa matrice transposée (Goupy & Creighton 2006).

Sur la base de la matrice présentée dans le tableau III. 1, de nombreuses autres matrices peuvent être développées, telles que les invariants donnés par la relation III.6 (Goupy & Creighton 2006):

$$(X'X) = \left(\frac{1}{N} I_N\right)^{-1} \quad (\text{III.6})$$

Avec : I_N : matrice identité et N : nombre de configurations.

En reportant l'expression (III.6) dans la formule (III.5), nous obtenons :

$$\hat{a} = \left(\frac{1}{N} I\right)^{-1} {}^t(X) y = \left(\frac{1}{N}\right) {}^t(X) y \quad (\text{III.7})$$

III.5. différents plans d'expériences existants

Parmi les plans d'expériences existants, certains sont plus utilisés. Nous distinguons:

III.5.1. Plan factoriel complet (PFC)

Le plan factoriel complet est un plan d'expériences qui permet de répondre, dans l'idéal, à deux questions différentes dans le même essai, «... *mettre en évidence non seulement leurs effets respectifs mais aussi leurs éventuelles interactions...* » (Vivier et al. 2007).

L'introduction aux plans *PFC* se fait par un exemple didactique (Goupy 1996). Il permet d'introduire les principales notations utilisées par la méthode des plans d'expériences. Il sert également de base à une généralisation de l'écriture mathématique utilisée.

Exemple : Dans le cas où n facteurs (qualitatifs et/ou quantitatifs) sont étudiés dans une même expérimentation, et que chacun a B niveaux de variations. Toutes les combinaisons B^n doivent être étudiées afin de définir tous les traitements (conditions expérimentales).

S'il n'est pas prévu de répéter chaque traitement, le nombre d'essais à réaliser est donc aussi égal à B^n . Dans le cas contraire, en appelant r le nombre de répétitions, devant être le même pour tous les traitements, le nombre total d'essais à réaliser dans le plan expérimental est donné par la formule (III.8) :

$$N = r * B^n \quad (\text{III.8})$$

III.5.2. Plan factoriel fractionnaire

Le plan factoriel fractionnaire est l'un des aspects les plus intéressants de la méthode des plans d'expériences. Il donne la possibilité de réaliser des plans factoriels à k facteurs avec moins de 2^k expériences (Box 1987 ; Goupy 1996 ; Driesbeke 1997).

Dans de nombreux domaines, les interactions d'ordre élevées sont souvent considérées comme négligeables. Trop d'expériences sont donc réalisées, d'où l'idée de diminuer la taille des plans et d'utiliser pour l'étude de k facteurs, des matrices d'expériences issues de plan 2^{k-1} , 2^{k-2} , ..., 2^{k-p} .

III.5.3. Plan Rechtschaffner

Les plans de Rechtschaffner (Rechtschaffner 1967) sont des plans factoriels fractionnaires simplifiés qui permettent de déterminer les effets des facteurs et les interactions d'ordre deux uniquement. Mis à part les interactions d'ordre un et deux, toutes les autres sont supposées nulles avant même l'expérimentation. Par conséquent, dans le cas d'utilisation de ce type de plan, le modèle mathématique à adopter au début de l'étude est :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i X_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} X_i X_j \quad (\text{III.9})$$

Il suffit de choisir un plan fractionnaire de résolution trois pour obtenir un plan de Rechtschaffner. Mais l'idée de ne déterminer que les effets principaux et les interactions d'ordre deux a été étendue par Rechtschaffner aux plans du second degré et aux facteurs prenant trois niveaux. Ces plans spéciaux sont indiqués dans des tables auxquelles il conviendra de se référer en cas de besoin (Dagnelie 2000).

III.5.4. Plans de Plackett et Burman

Les matrices de Plackett-Burman (Plackett & Burman 1946) ne sont autres que des matrices d'Hadamard (Benoist 1994 ; Driesbeke 1997). Ce sont des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 lignes. Elles permettent donc des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celles des plans factoriels qui, eux, ont seulement 2^k lignes (4, 8, 16, 32, etc.). Aussi, il est important de noter que ces derniers, sont des plans souvent saturés où le modèle mathématique (formule III.10) est alors un modèle sans interaction.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i X_i \quad (\text{III.10})$$

III.5.5. Plans de Koshal

Les plans de Koshal (Koshal 1933) sont des plans qui permettent de déterminer uniquement les effets principaux des facteurs. Par ailleurs, aucune interaction ne peut être évaluée. Par conséquent, le modèle mathématique adopté est analogue à celui des plans de Plackett et Burman (formule III.7). Malgré le fait que ces plans soient peu connus, leur emploi, dans certains cas, peut-être d'une grande utilité, comme pour dégrossir un problème (Akkouche et al., 2018). Il convient aussi de noter que ces plans forment le début d'un plan factoriel et qu'il est toujours loisible de le compléter pour obtenir un plan complet ou fractionnaire.

III.5.6. Tables de Taguchi

Ces plans sont issus des travaux de Genichi Taguchi (Taguchi & Konishi 1987) dans le but de permettre une utilisation simplifiée des plans factoriels. Les modèles utilisés dans ce cadre étant d'ordre strictement inférieur à 3, seules les composantes nécessaires sont gardées, lors du calcul des coefficients restants. Très souvent, les interactions d'ordre 2 ne sont pas toutes calculées, ce qui apporte des allègements de calcul parfois intéressants.

III.6. Conclusions

Les plans d'expériences consistent à mettre en œuvre une stratégie de travail dans le but de réduire le nombre de simulations, tout en atteignant rapidement les réponses aux questions posées. Dans le cas des plans factoriels, il faut déterminer les effets des paramètres que l'utilisateur juge influents sur le phénomène. Pour cela, tous les cas envisageables ont été développés dans cette partie.

Vu que la représentation complète de l'information ne peut-être obtenue qu'avec un plan factoriel complet (Goupy 1990; Dagnelie 2000), son utilisation a été favorisée dans cette étude. Ce plan permet non-seulement de mettre en évidence les facteurs étudiés, qui agissent sur la réponse mesurée, mais aussi, d'évaluer les diverses interactions susceptibles de se produire entre les actions des facteurs.

Partie B : application de la méthode PFC, pour une estimation quantitative du degré de dommage local et global.

Dans cette section, des modèles de prédictions mathématiques, permettant d'améliorer la précision et l'objectivité des décisions sur l'état de dommage de l'ensemble des éléments structuraux, non-structuraux et de toute la structure ont été développés. Dans cette perspective, la démarche proposée est fondée sur les appréciations d'experts. Celles-ci sont consignées dans une banque de données constituée de 7890 fiches (constructions) élaborées par les experts du CGS et du CTC lors du séisme de 21 Mai 2003 ayant secoué la région de Boumerdes. Dans cette étude, le plan de type factoriel complet est adopté. Ce choix s'appuie sur les recommandations présentées dans les différents travaux de Goupy (Goupy 1990 ; Goupy 2000). Afin de distinguer entre la caractérisation des désordres élémentaires et l'évaluation des dommages globaux, le travail réalisé suit le cheminement suivant :

En premier lieu, deux modèles d'évaluation de dommages à l'échelle locale sont établis, permettant d'estimer l'état du :

Bloc éléments Résistants D_{ER} , en fonction de l'état de l'élément : porteur D_{EP} , de contreventement D_{EC} , plancher-toiture-terrasse D_{EPT} et toiture inclinée D_{ETI} .

Bloc éléments Non-résistants D_{ENR} , en fonction des niveaux de dégâts associés à l'élément : Escalier D_{EES} , Remplissage Extérieur D_{ERE} , Éléments Intérieurs D_{EEI} et Éléments Extérieurs D_{EE} .

Un second tri est mené pour l'évaluation de la grandeur, qui caractérise l'état de la construction dans son ensemble D_G , en fonction des dommages locaux D_{ER} et D_{ENR} .

III.7. Application des plans factoriels complets pour l'estimation du niveau de dommage local

III.7.1. Partie éléments résistants *PER*

En référence à la fiche d'évaluation de dommage (figure II.13), il a été constaté que la réponse D_{ER} est étroitement liée aux quatre facteurs: « D_{EP} , D_{EC} , D_{EPT} et D_{ETI} ». Malgré que ces facteurs fassent partie de la même famille d'éléments notée « *PER* », l'impact de leurs influences sur le dommage D_{ER} diffère d'un élément à un autre. À cet effet, l'estimation des poids de chaque paramètre et de chacune de leurs interactions est une tâche fondamentale pour la bonne compréhension de la variation de la réponse D_{ER} .

III.7.1.1. Construction du plan

Selon le plan d'expérience adopté (PFC), le nombre de configuration est de $2^4=16$, où les chiffres 2 et 4 représentent successivement, les deux niveaux de variation de chaque facteur D_1 et D_5 ainsi que le nombre de ces facteurs.

III.7.1.2. Représentation sous forme de tableau

Suivant les recommandations données par (Goupy & Creighton 2006), une représentation géométrique n'est pas acceptable, du fait que le nombre de facteurs est supérieur à trois. Par conséquent, une représentation matricielle (sous forme de tableau) est adoptée dans cette partie (tableau III.2).

Tableau III.2.Représentation du tableau d'expérimentations A et du plan d'expériences B.

N essais	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
1	D ₁	D ₁	D ₁	D ₁
2	D ₅	D ₁	D ₁	D ₁
3	D ₁	D ₅	D ₁	D ₁
4	D ₅	D ₅	D ₁	D ₁
5	D ₁	D ₁	D ₅	D ₁
6	D ₅	D ₁	D ₅	D ₁
7	D ₁	D ₅	D ₅	D ₁
8	D ₅	D ₅	D ₅	D ₁
9	D ₁	D ₁	D ₁	D ₅
10	D ₅	D ₁	D ₁	D ₅
11	D ₁	D ₅	D ₁	D ₅
12	D ₅	D ₅	D ₁	D ₅
13	D ₁	D ₁	D ₅	D ₅
14	D ₅	D ₁	D ₅	D ₅
15	D ₁	D ₅	D ₅	D ₅
16	D ₅	D ₅	D ₅	D ₅

A

N essais	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1

B

Où : $F_1 = D_{EP}$; $F_2 = D_{EC}$; $F_3 = D_{EPTT}$; $F_4 = D_{ETL}$. Pour les éléments structuraux,

Le passage du plan d'expérimentations (tableau A), composé de valeurs réelles «naturelles» utilisées pour les différents facteurs lors de l'évaluation post sismique, à la matrice d'expérience (tableau B), qui elle est constituée de valeurs codées «centrées réduites» est très intéressant, car cette matrice permet d'une part la généralisation de la théorie des plans d'expériences, et d'une autre part, elle est indispensable pour la prise en considération des différents liens «interactions» existants entre les facteurs (Dagnelie 2000).

À partir du plan d'expérience présenté (tableau III.2) et de la forme du modèle mathématique adopté (Forme polynômial, dans ce cas), la matrice du modèle «matrice des

effets» notée X a été élaborée (tableau III.3). Celle-ci se caractérise par un nombre de lignes identique à celui de la matrice d'expériences, et par un nombre de colonnes équivalant à celui des inconnues du modèle proposé (modèle polynômial de degré un, avec interactions d'ordre trois).

Tableau III.3. Matrice des effets « matrice du modèle » noté X.

Facteurs				Interactions D'ordre										
				1						2				3
F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	I ₁₂	I ₁₃	I ₁₄	I ₂₃	I ₂₄	I ₃₄	I ₁₂₃	I ₁₂₄	I ₁₃₄	I ₂₃₄	I ₁₂₃₄
-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1
-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1
+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1
-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1
-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Les paramètres de la matrice sont définis comme suit:

I_{ij} : interaction entre les facteurs F_i et F_j (interactions d'ordre 1)

I_{ijk} : interaction entre les facteurs F_i, F_j et F_k (interactions d'ordre 2).

I_{ijkl} : interaction entre les facteurs F_i, F_j, F_k et F_l (interactions d'ordre 3).

Ainsi, quinze configurations sont obtenues. Cependant, pour aboutir au nombre de configuration fixé par la dimension du plan ($2^4=16$), une seizième configuration s'y ajoute, tenant compte uniquement des niveaux bas de tous les facteurs.

III.7.1.3. Traitement des données

Avant d'entamer la construction de la matrice précédemment définie, un traitement préalable de données d'enquête post-sismique s'effectue selon trois phases successives:

Une première sélection est établie dans le but d'éliminer toutes les fiches «constructions», dont la description du dommage final D_G est relative : à l'endommagement de (s) structure (s) voisine (s) D_{SA} et/ou aux effets induits par le séisme D_S (désordres-dans le sol).

Un second tri est réalisé dans l'objectif de n'avoir que les paramètres de la PER comme variables. Ainsi, seules les fiches «constructions» qui ont un $D_{ENR} = 2$ (soit tous les éléments de la PES ont un niveau de dommage égale à D_2) sont prises en considération.

Enfin, un tri au cas par cas suivant la méthode des PFC est effectué. En effet, seules les fiches utiles pour l'étude sont extraites de la base de données, seules les fiches d'évaluation répondant aux exigences de 16 configurations définies initialement sont extraites de la base de données. Selon ces configurations, les résultats obtenus pour la quantité D_{ER} sont donnés dans le tableau III.4.

Tableau III.4. Résultats d'endommagement de l'ensemble des éléments structuraux.

N	1	2	3	4	5	6	7	8
D_{ER}	1,875	3,247	3,128	4,091	2,92	3,69	3,239	4,626
N	9	10	11	12	13	14	15	16
D_{ER}	2,67	3,769	3,713	4,267	3,108	4,013	4,139	4,558

Afin de minimiser l'influence éventuelle d'une erreur systématique sur les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus, un principe a été retenu : pour chaque configuration, la réponse retenue est équivalente à la moyenne de tous les D_G présentés sur les fiches. À titre d'exemple, la réponse de la 1^{ère} configuration est la moyenne de 37 réponses «fiches».

Les différentes sorties indiquées dans le tableau III.4., permettent d'apprécier d'une part l'influence des divers facteurs agissant sur la réponse D_{ER} , et d'autre part celle de leurs interactions. L'analyse, constituant un traitement mathématique des résultats présentés dans le tableau III.4., permet d'évaluer l'influence des quatre facteurs et de leurs interactions sur la variation de la réponse D_{ER} . Cette procédure mathématique est réalisée selon le concept présenté ultérieurement (§ III.4.6). À titre d'exemple, pour estimer l'influence du facteur D_{EP} (représentée par le coefficient a_2) sur la variation de D_{ER} , à partir de la relation (III.6), nous pouvons écrire:

$$a_2 = \frac{1}{16} (D_{ER1} + D_{ER2} + D_{ER3} + D_{ER4} + D_{ER5} + D_{ER6} + D_{ER7} + D_{ER8} + D_{ER9} + D_{ER10} + D_{ER11} + D_{ER12} + D_{ER13} + D_{ER14} + D_{ER15} + D_{ER16})$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{8} (D_{ER2} + D_{ER4} + D_{ER6} + D_{ER8} + D_{ER10} + D_{ER12} + D_{ER14} + D_{ER16}) \right] - \left[\frac{1}{8} (D_{ER1} + D_{ER3} + D_{ER5} + D_{ER7} + D_{ER9} + D_{ER11} + D_{ER13} + D_{ER15}) \right]$$

Or $\left(\frac{D_{ER2} + \dots + D_{ER14}}{8} \right)$ est la moyenne des réponses au niveau haut du facteur D_{EP} . Cette moyenne est nommée D_{ER}^+ . Quant à l'expression $\left(\frac{D_{ER1} + \dots + D_{ER15}}{8} \right)$, elle représente la

moyenne des réponses au niveau bas du facteur D_{EP} , soit D_{ER}^- . De ce fait, les effets des facteurs et de leurs interactions sont estimés par l'équation (III.11) :

$$a_i = \frac{1}{2}(+ef^+ - ef^-) \quad (III.11)$$

Avec : ef^+ : effets positifs du facteur, ef^- : effets négatifs du facteur.

Cette procédure exécutée en déterminant les coefficients associés à chacune des variables du modèle, aboutit à l'obtention des résultats du tableau III.5.

Tableau III.5. Poids des facteurs et des interactions intervenant sur la réponse D_{ER} .

Effets Principaux			Interactions					
Facteur	Coeff **	Valeur (10^{-1})	D'ordre un			D'ordre deux et trois		
			Facteur	Coeff **	Valeur (10^{-1})	Facteur	Coeff **	Valeur (10^{-1})
D_{EP}	b_1	4,67	$D_{EP} D_{EC}$	b_{12}	-0,514	$D_{EP} D_{EC} D_{EPT}$	b_{123}	0,6785
D_{EC}	b_2	4,0435	$D_{EP} D_{EPT}$	b_{22}	-0,3165	$D_{EP} D_{EC} D_{ETI}$	b_{124}	-0,094
D_{EPT}	b_3	2,2085	$D_{EP} D_{ETI}$	b_{32}	-0,9465	$D_{EC} D_{EPT} D_{ETI}$	b_{134}	-0,774
D_{ETI}	b_4	2,1385	$D_{EC} D_{EPT}$	b_{42}	-0,504	$D_{EC} D_{EPT} D_{ETI}$	b_{234}	0,5485
			$D_{EC} D_{ETI}$	b_{24}	-0,1465	$D_{EP} D_{EC} D_{EPT} D_{ETI}$	b_{1234}	-0,038
			$D_{EPT} D_{ETI}$	b_{34}	-0,459			

Selon le signe du coefficient (coeff**), les valeurs exprimant les facteurs et les interactions peuvent être positives ou négatives (Dagnelie 2000). La variable statistiquement significative à un niveau de confiance de 95% est testée à l'aide d'une analyse de variance appelée ANOVA (Montgomery 1997), la représentation graphique de ces effets est illustrée dans le diagramme de la Figure III.6.

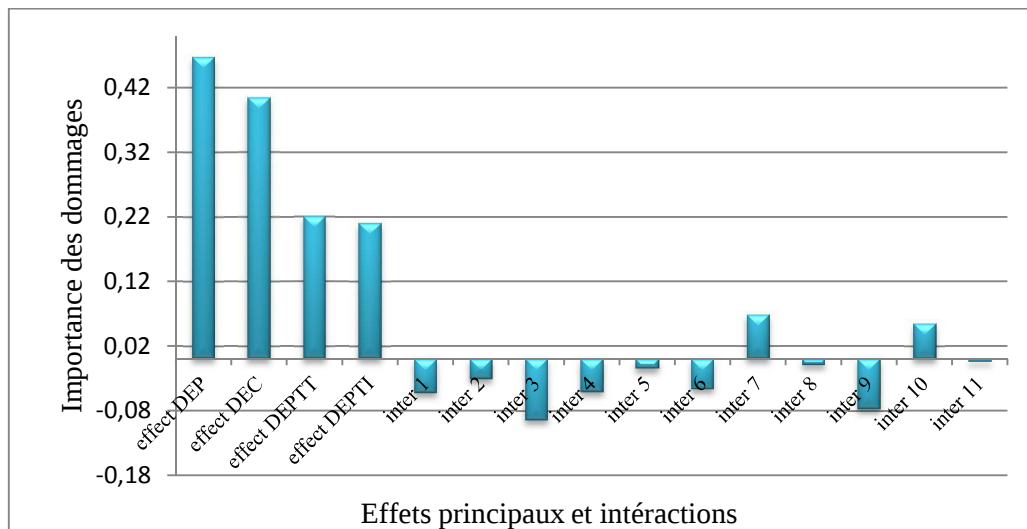


Figure III.6. Diagramme des effets des facteurs de la PER et de leurs interactions.

Cette figure montre que la dégradation estimée pour l'ensemble des composants structuraux D_{ER} augmente avec l'aggravation des dommages associés aux éléments résistants. Parmi les quatre effets principaux, le facteur D_{EP} est nettement plus influent que

les trois autres. Néanmoins, aucun de ces facteurs ne peut être négligé, car ceux-ci peuvent considérablement influencer sur le degré de dommage D_{ER} . L'importance des facteurs D_{EP} et D_{EC} est représentée par des coefficients de valeurs avoisinantes 0,5 et 0,4 respectivement. Les facteurs D_{EPTT} et D_{ETI} induisant un effet similaire, sont évalués par un coefficient dont la valeur est proche de 0,2. Les valeurs négatives, traduisant certaines interactions, confirment l'influence de l'écart entre les effets principaux. Toutes les interactions sont prises en considération, hormis celles liées à l'interaction du 3^{ème} ordre (provenant de l'endommagement de quatre composants à la fois). L'apport de cette ultime interaction sur la réponse « D_G » est très faible (inférieure à 1%), confirmant que la combinaison de trois désordres élémentaires induit un état d'ensemble qui converge vers la catégorie « D_5 ».

a- Représentation graphique des effets principaux

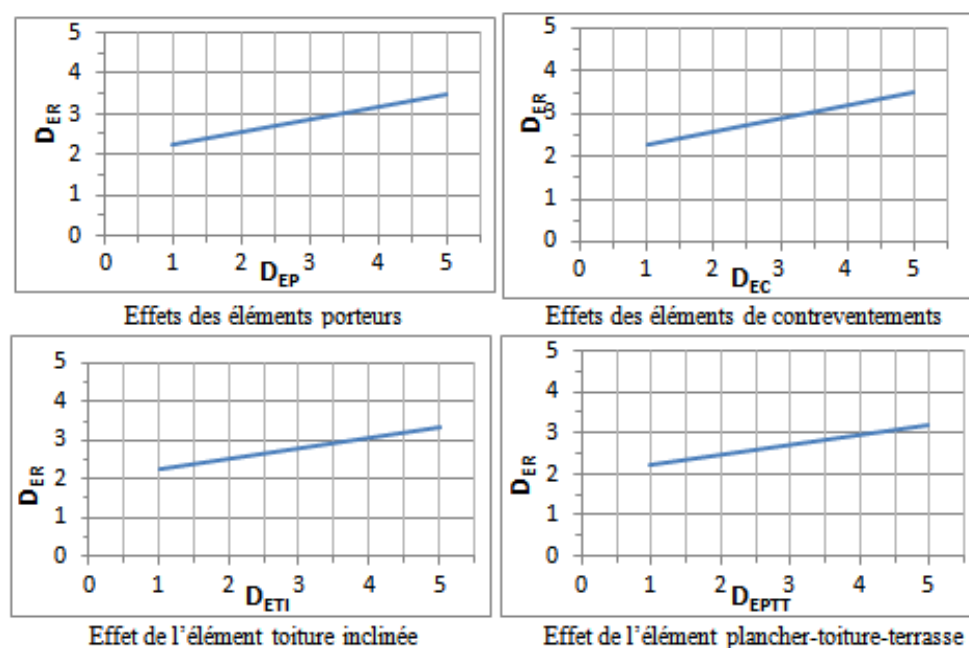


Figure III.7. Représentation graphique des effets principaux.

La figure III.7 illustre l'effet causé par l'endommagement de chaque composant structurel sur la variation de la grandeur D_{ER} , reflétant l'état de leur ensemble. Ainsi, la variation de l'état de dommage (allant de D_1 à D_5) de chaque facteur induit une évolution remarquable de la valeur de la grandeur, indiquant l'état de dommage de tous les éléments structuraux. Initialement, le même degré de dommage avoisinant D_2 est constaté pour la grandeur D_{ER} lorsque le niveau de dommage de chacun des facteurs est fixé à D_1 , par contre, une légère différence est obtenue sur la réponse D_{ER} lors de la variation du niveau de dommage de ces même composants (niveau de dommage fixé à D_5). Nous pouvons dire que deux degrés distincts sont enregistrés pour D_{ER} , pratiquement la même réponse

avoisinant la valeur de 3,5 est obtenue sous l'effet de la variation du paramètre D_{EP} et du paramètre D_{EC} . Une autre valeur de la réponse de 3,15 proche du niveau D_3 est obtenue suite à la variation des facteurs D_{ETI} et D_{EPTT} .

b- Représentation graphique des interactions du premier ordre

Ces interactions dites d'ordres un, représentent la capacité d'un composant endommagé à faire varier la réponse D_{ER} sous l'effet d'un autre composant endommagé.

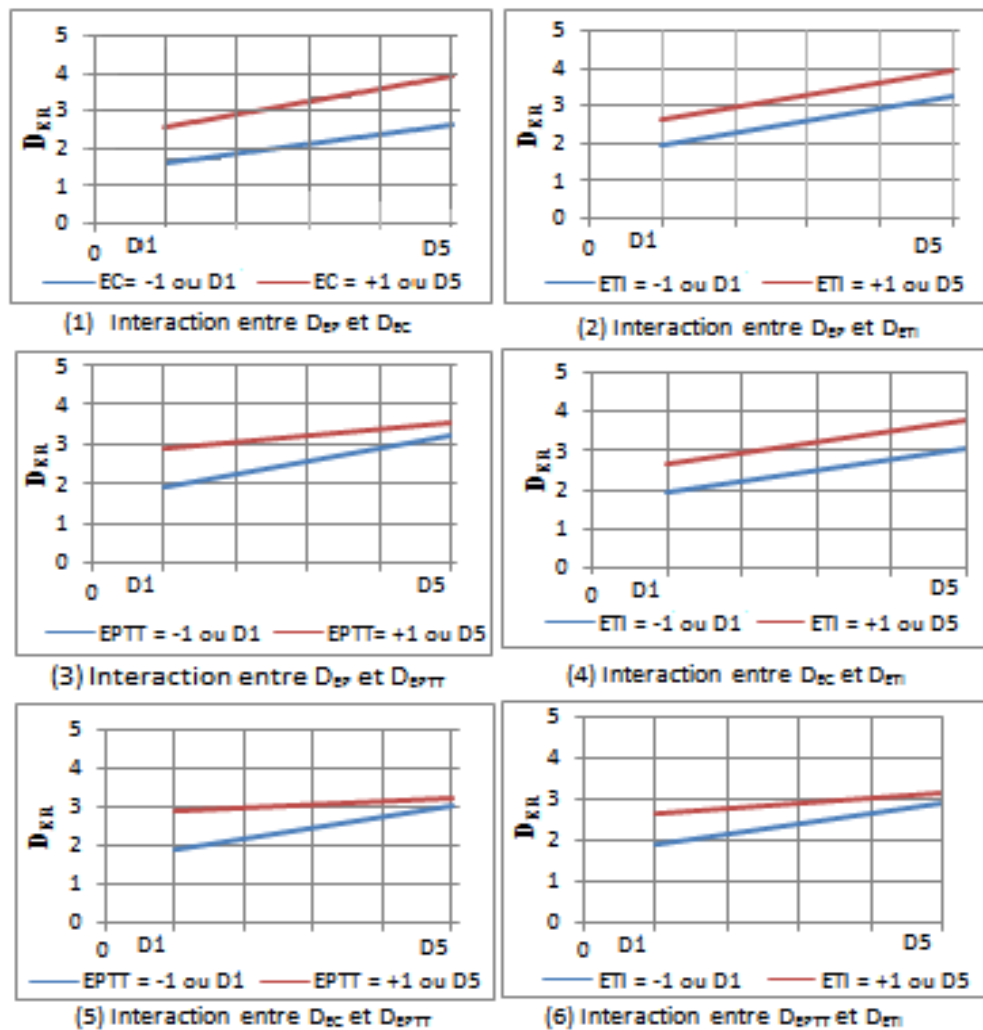


Figure III.8. Représentation graphique des interactions de premier ordre de la partie éléments résistants.

Les courbes données par la figure (III.8) illustrent les différentes interactions, dites d'ordres un, qui peuvent exister entre les quatre composants principaux. Les courbes 1, 3, 5 et 6 exposent la forte interaction qui existe entre les composants (D_{EP} et D_{EC}), (D_{EP} et D_{EPTT}), (D_{EC} et D_{EPTT}) et (D_{EPTT} et D_{ETI}) respectivement. Puis, de la courbe 2, une faible interaction est constatée entre les composants (D_{EP} et D_{ETI}), et une autre plus faible entre les éléments (D_{EC} et D_{ETI}) selon les résultats illustrés à la courbe 4. Aussi, des courbes 3, 5

et 6 nous remarquons que la capacité du facteur mobile à faire varier la réponse D_{ER} diminue sous l'évolution de l'autre facteur immobile (fixé à D_1 puis à D_5).

Exemple, dans la courbe 5, nous remarquons que lorsque le D_{EPTT} est fixé à D_1 (la courbe en bleu), la variation du niveau de dommage D_{EC} de D_1 à D_5 induit une variation importante de la réponse D_{ER} . Par contre, lorsque le D_{EPTT} est fixé à D_5 (la courbe en rouge), la variation de la réponse D_{ER} est peu influencée par la variation du niveau de D_{EC} . Alors que dans la courbe 1, nous constatons que la capacité du facteur mobile (dans ce cas D_{EC}) à faire varier la réponse D_{ER} augmente avec l'évolution de l'autre facteur immobile (dans ce cas D_{EP}).

c- Représentation graphique des interactions d'ordres supérieures

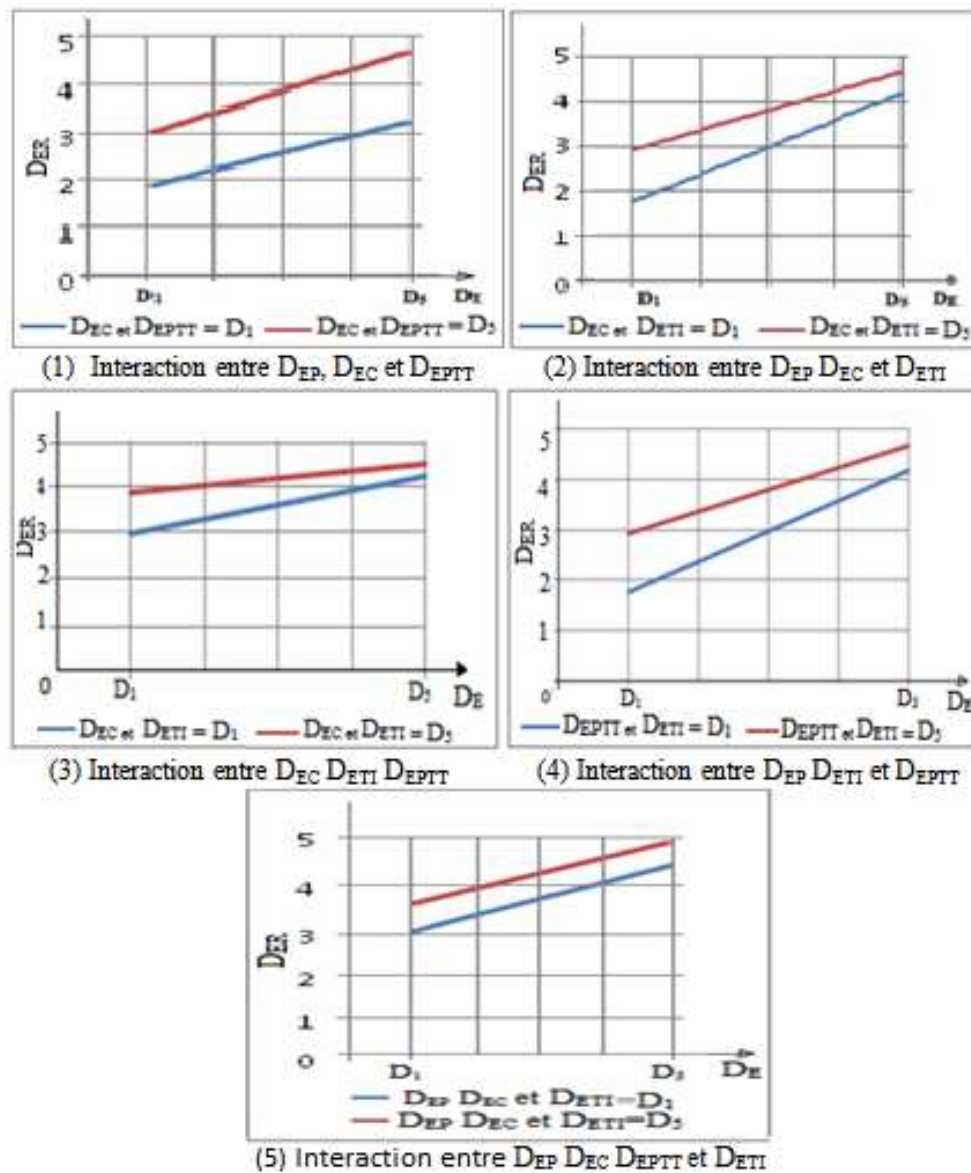


Figure III.9. Représentation graphique des interactions d'ordres supérieurs pour les éléments résistants.

La figure III.9 illustre les interactions d'ordres 2 et 3 données par trois et quatre facteurs respectivement. Les courbes 1, 2, 3 et 4 démontrent que les interactions entre les différents facteurs ne peuvent être négligées. Ainsi, l'allure des droites de la 1^{ère} courbe, indique que l'effet de la variation du niveau de dommage du composant porteur sur la grandeur reflétant l'état de dommage de l'ensemble des éléments structuraux est pratiquement constant, sous l'effet de la variation du couple de dommage des composants, contreventement et plancher- toiture-terrasse et ce, malgré l'évolution de la réponse (d'un niveau de dommage), sous l'effet de l'état du couple de dommage. Par contre, les courbes 2, 3 et 4, indiquent que l'effet du facteur immobile sur la réponse D_{ER} varie négativement sous l'influence du couple de dommage. Exemple, sur la 2^{ème} courbe, on constate que la catégorie de dommage attribuée à la réponse D_{ER} sous l'effet de l'élément porteur passe de 1,5 à 4 et de 3 à 4,5, et ceci, lorsque les composants (contreventement et toiture inclinée) sont fixés au niveau D_1 et D_5 respectivement. Aussi, de la courbe 5, nous pouvons dire que la réponse D_{ER} est pratiquement invariante après l'endommagement de 3 composants, ce qui explique l'ignorance de l'état de dommage du quatrième élément.

Remarque : lors de cette interprétation, seul le critère sécurité est pris en considération

En prenant en considérations les effets significatifs (effets principaux et interactions), le modèle qui classifie le niveau de dommage de l'ensemble des éléments résistants d'une structure, peut être exprimé par l'équation suivante :

$$D_{ER} = (0.467 \times D_{EP}) + (0.40435 \times D_{EC}) + (0.22085 \times D_{EPTT}) + (0.21385 \times D_{ETI}) + (-0.0514 \times D_{EP} \times D_{EC}) + (-0.03165 \times D_{EP} \times D_{EPTT}) + (-0.0504 \times D_{EC} \times D_{EPTT}) + (-0.09465 \times D_{EP} \times D_{ETI}) + (-0.01465 \times D_{EC} \times D_{ETI}) + (-0.0459 \times D_{EPTT} \times D_{ETI}) + (0.06785 \times D_{EP} \times D_{EC} \times D_{EPTT}) + (-0.0094 \times D_{EP} \times D_{EC} \times D_{ETI}) + (-0.0774 \times D_{EP} \times D_{EPTT} \times D_{ETI}) + (0.05485 \times D_{EC} \times D_{EPTT} \times D_{ETI}).$$

III.7.2 Modèle d'estimation de la grandeur reflétant l'état d'ensemble des éléments non-structuraux

La section des éléments non-structuraux illustrée sur la figure II.13, indique que la variable de réponse, D_{ENR} est influencée par la variation de quatre facteurs; Escalier D_{EES} , remplissage extérieur D_{ERE} , éléments intérieurs D_{EI} et éléments extérieurs D_{EE} . Dans l'objectif de développer une relation mathématique démontrant l'impact de ces facteurs sur l'état de l'ensemble D_{ENR} , la démarche adoptée précédemment (§ III.7.1 est quasiment reproduite. En effet, dans ce cas d'étude, lors de la deuxième sélection, tous les

composants structuraux (de la PER) sont fixés au même niveau de dommage égal à D_1 . Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau III.6.

Tableau III.6. Résultats de l'endommagement de l'ensemble des éléments non structuraux.

N	1	2	3	4	5	6	7	8
D_{ENR}	1,153	,351	2,6152	3,235	2,732	3,556	3,106	3,833
N	9	10	11	12	13	14	15	16
D_{ENR}	2,154	3,5	3,185	3,75	3,333	3,02	3,87	4,143

Le tableau (III.6) présente les valeurs moyennes des dommages globaux, fournies par les formulaires d'évaluation en adéquation avec les conditions fixées par toutes les configurations. Cette procédure permet de minimiser l'influence des erreurs commises initialement.

III.7.2.1 Calcul des inconnus du modèle

L'analyse des résultats présentés ci-dessus a permis d'une part, de calculer les coefficients du modèle recherché, selon la démarche illustrée précédemment (§ III.6.1), d'autre part, de classer les effets, selon l'importance de leur influences, sur la réponse D_{ENR} (figure III. 10).

Tableau III.7. Les poids des facteurs et de leurs interactions intervenant sur le D_{ENR} .

Effets Principaux			Interactions					
			D'ordre un			D'ordre deux et plus		
Facteur	Coeff	Valeur (10^{-1})	Facteur	Coeff	Valeur (10^{-1})	Facteur	Coeff	Valeur (10^{-1})
D_{ES}	c_1	4,418	$D_{ES} D_{EMM}$	c_{12}	0,1193	$D_{ES} D_{EMM} D_{EI}$	c_{123}	-0,14437
D_{EMM}	c_2	4,1556	$D_{ES} D_{EI}$	c_{22}	-0,7931	$D_{ES} D_{EMM} D_{EE}$	c_{124}	-0,0556
D_{EI}	c_3	2,8681	$D_{ES} D_{EE}$	c_{32}	-0,4818	$D_{ES} D_{EI} D_{EE}$	c_{134}	0,1318
D_{EE}	c_4	2,0818	$D_{EMM} D_{EI}$	c_{42}	0,06937	$D_{EMM} D_{EI} D_{EE}$	c_{234}	0,14438
			$D_{EMM} D_{EE}$	c_{24}	-0,24437	$D_{ES} D_{EMM} D_{EI} D_{EE}$	c_{1234}	-0,00687
			$D_{EI} D_{EE}$	c_{34}	0,1681			

Après la détermination des poids (effets principaux et interactions), l'importance des dommages non-structuraux est illustrée par la figure III.10.

III.7.2.2 Identification des paramètres (facteurs et interactions) influents sur la variation de la réponse D_{ENR}

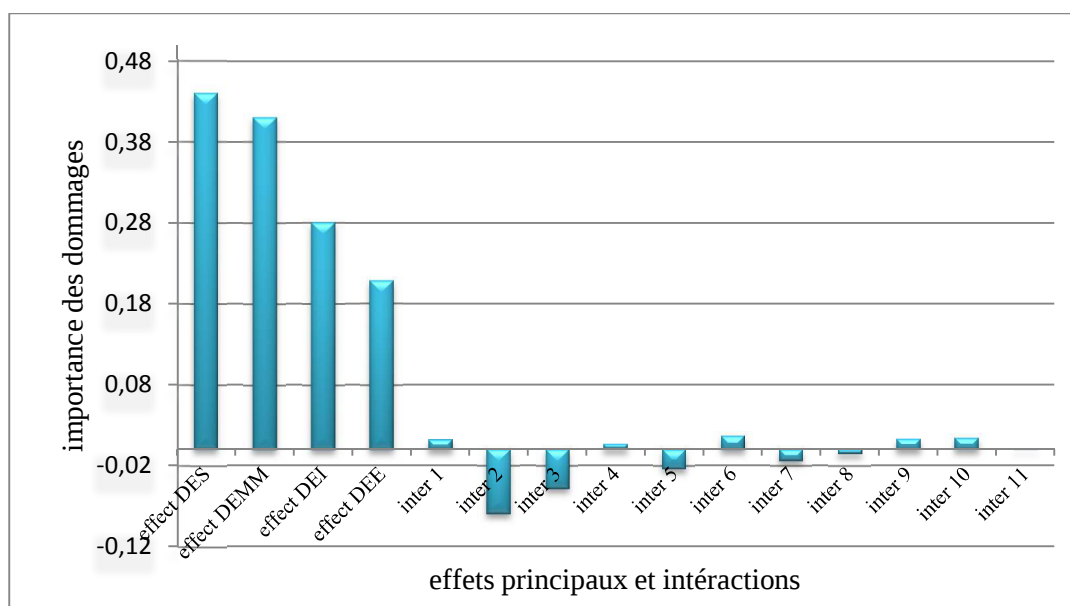


Figure III.10. Effets des facteurs « éléments résistants » et de leurs interactions.

Cette figure montre que la variation de l'état de dommage de l'ensemble des éléments secondaires D_{ENR} est influencée positivement par les différents dommages élémentaires D_{EES} , D_{EMR} , D_{EI} et D_{EE} . L'importance des facteurs D_{EI} et D_{EE} est donnée par des coefficients proches des valeurs 0,3 et 0,2, respectivement.

Aussi, parmi les interactions (d'ordre un, deux et trois) obtenues entre les différents facteurs, nous constatons que celles d'ordres un (entre deux facteurs uniquement) ont un effet plus important sur la variation de la réponse D_{ENR} , en particulier, celles obtenues entre ($D_{EES}-D_{EMR}$, $D_{EES}-D_{EI}$ et $D_{EMR}-D_{EI}$). En d'autres termes, l'importance des dommages constatés sur les éléments : Escalier et Murs de Remplissage ou Escalier et Éléments Intérieurs ou Murs de Remplissage et Éléments Intérieurs, influe considérablement sur la catégorie de dommage à accorder pour l'ensemble des éléments secondaires. Par contre, une faible influence est notée sur cette dernière sous l'effet des interactions d'ordres supérieurs, mis à part, les interactions entre les éléments ($D_{EES}-D_{EMR}-D_{EI}$, $D_{EES}-D_{EI}-D_{EE}$ et $D_{EMR}-D_{EI}-D_{EE}$). Aussi, il est à noter qu'au-delà de l'endommagement de trois éléments secondaires, la catégorie de dommage à attribuer à leurs ensembles, ne varie plus ou varie d'une manière négligeable.

III.7.2.3. Représentation graphique des effets des éléments secondaires et de leurs interactions

a- Représentation graphique des effets principaux

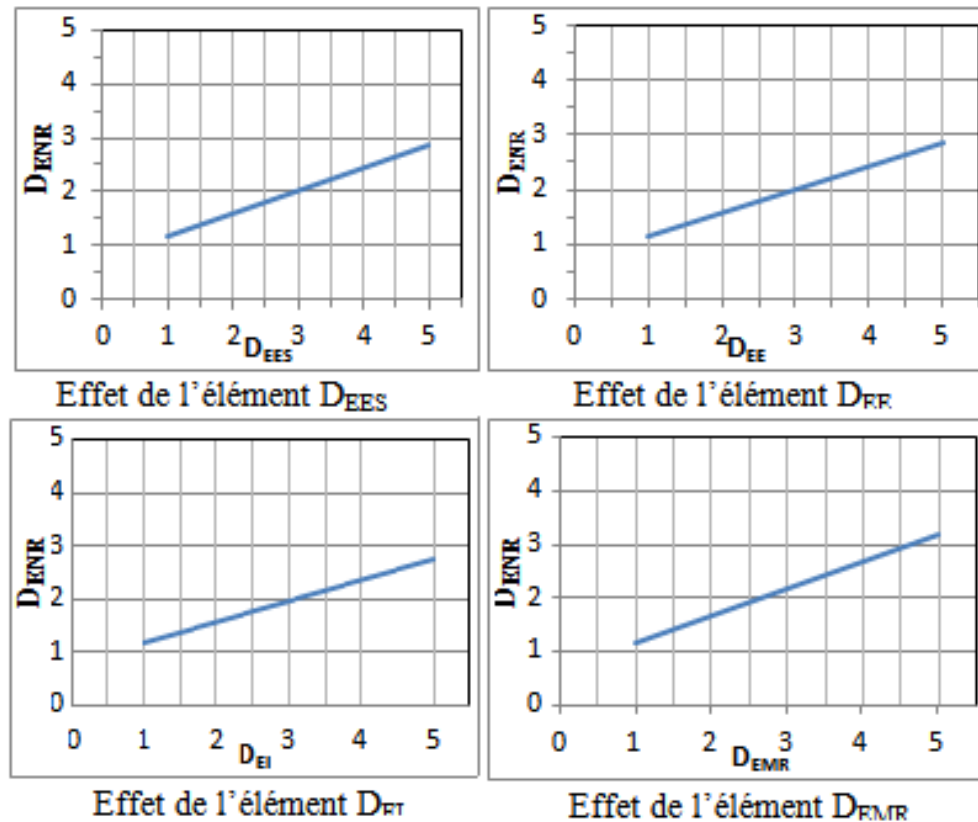


Figure III.11. Représentation graphique des effets principaux.

La figure ci-dessus illustre les effets principaux de différents facteurs sur la réponse D_{ENR} . Pour les quatre facteurs, la même réponse D_{ENR} , légèrement supérieur au niveau D_1 est obtenue lorsque le niveau de dommage de l'élément est au niveau bas D_1 . Lorsque le niveau de dommage de l'élément est fixé à D_5 , la même réponse D_{ENR} , aux alentours du niveau D_3 est obtenue. Ainsi, l'évolution du niveau de dommage de chaque élément (de D_1 à D_5) fait varier la réponse D_{ENR} , de deux catégories.

b- Représentation graphique des interactions du premier ordre

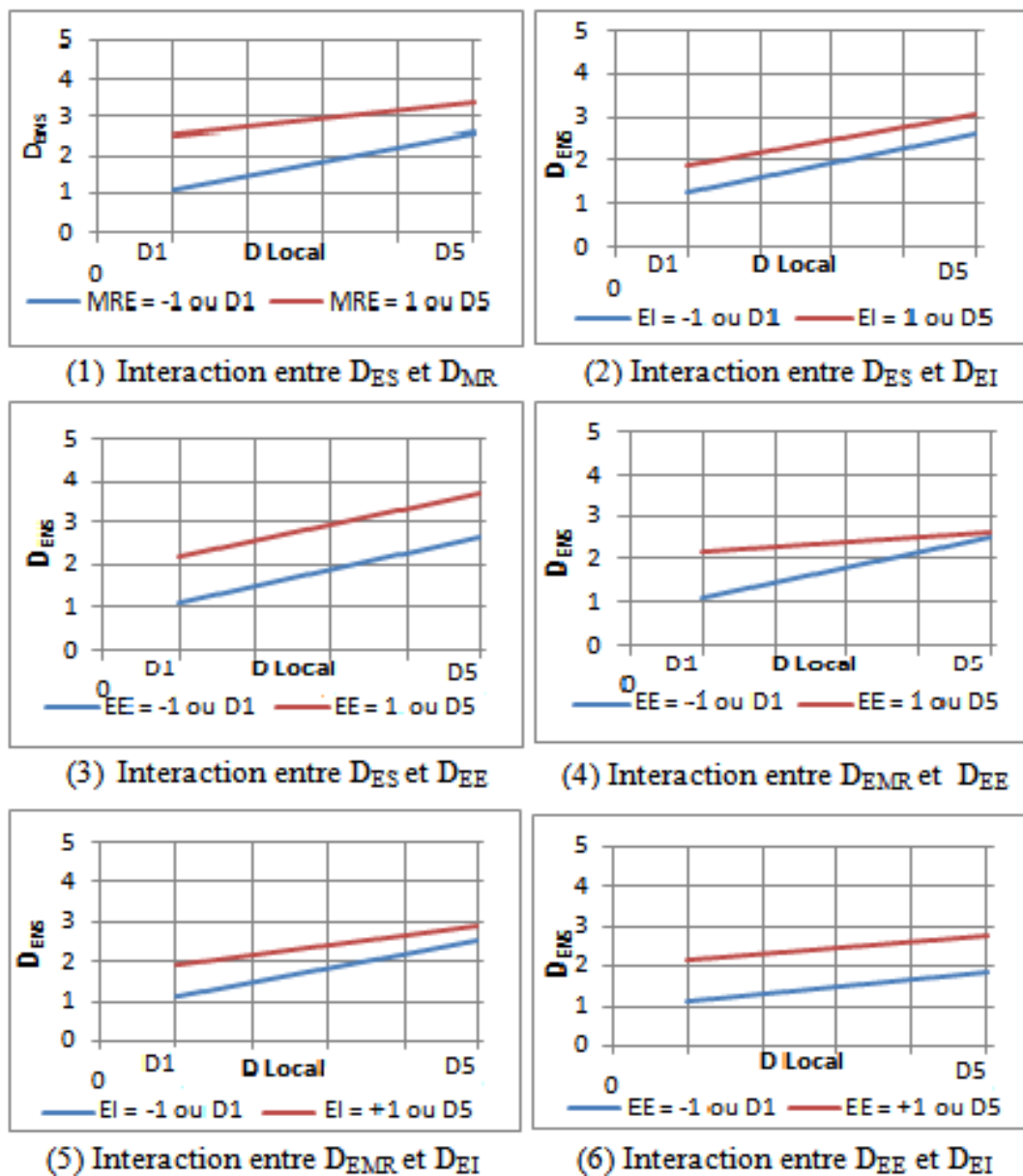


Figure III.12. Représentation graphique des interactions de premier ordre de la partie éléments résistants.

La figure III.12 illustre les différentes interactions qui peuvent exister entre deux éléments. Ainsi, la capacité de chaque élément à faire varier la réponse D_{ENR} sous l'effet d'un autre élément est démontrée. En se référant à l'allure des droites, une forte interaction entre les éléments (D_{ES} - D_{EMR} , D_{EMR} - D_{EI} et D_{EMR} - D_{EE}) est constatée. Exemple, dans le cas de l'interaction (4) entre D_{EMR} - D_{EE} , lorsque le niveau de dommage de l'élément murs de remplissage est fixé à D_1 , la réponse D_{ENR} varie de 1 à 2,5 (soit une évolution de 150 %), sous l'effet de la variation du niveau de dommage de l'élément extérieur (allant de D_1 à D_5). Par contre, lorsque le niveau de dommage de l'élément murs de remplissage est fixé à

D_5 , la réponse D_{ENR} varie du niveau 2 à 2,5 (soit avec une évolution de 50%), sous l'effet de la variation du niveau de dommage de l'élément extérieur (allant de D_1 à D_5). Aussi, de faibles interactions sont constatées entre les éléments (D_{ES} - D_{EE} , D_{ES} - D_{EI} et D_{EE} - D_{EI}). A titre d'exemple, dans le cas de l'interaction (3), nous remarquons que l'évolution de la réponse D_{ENR} sous l'effet de la variation du niveau de dommage de l'élément extérieur est invariable, lorsque le niveau de dommage de l'élément escalier est fixé D_1 et D_5 .

c- Représentation graphique des interactions d'ordres supérieure

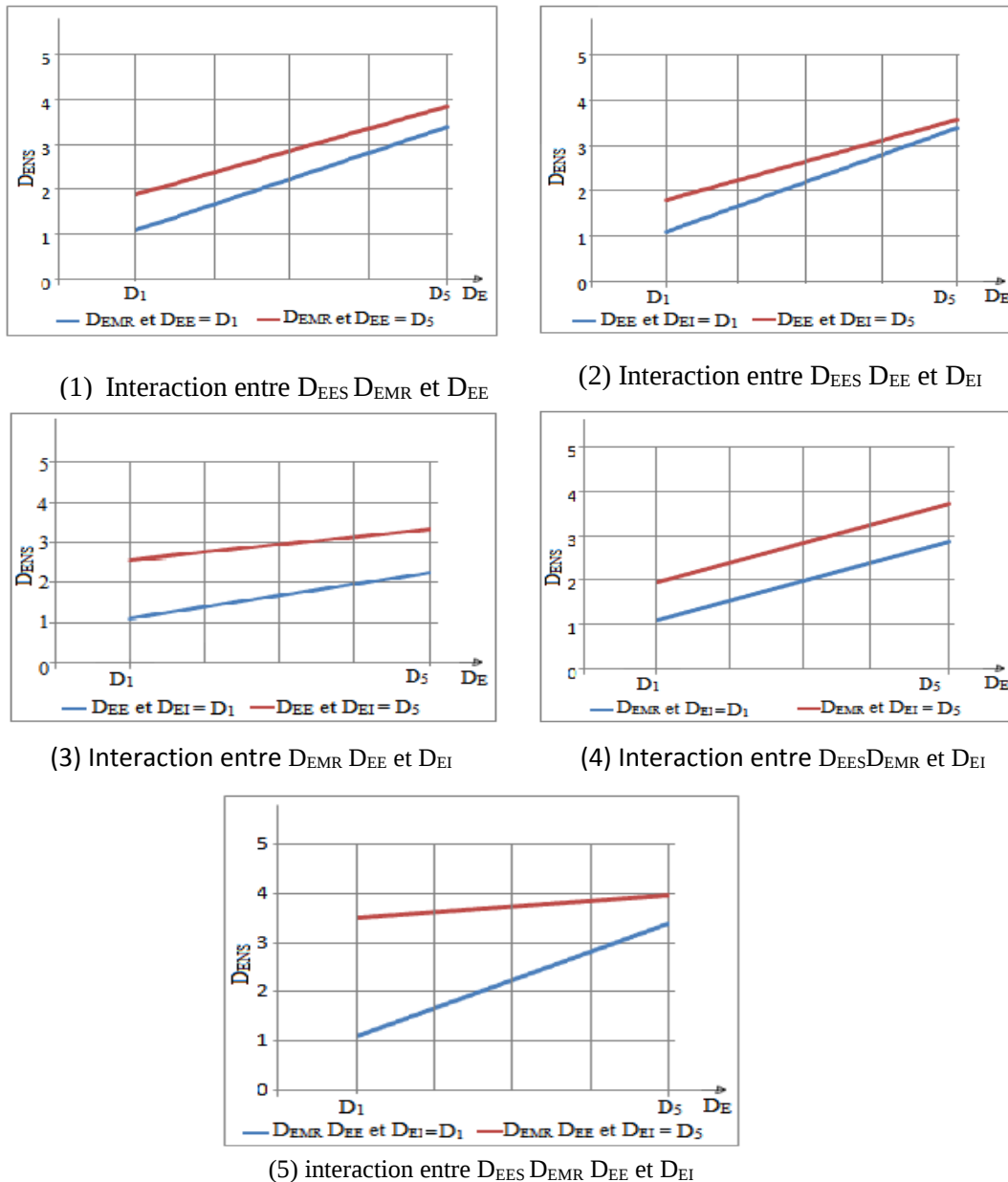


Figure III.13. Représentation graphique des interactions d'ordre supérieur, de la partie éléments non-résistants.

La figure III.13, illustre les interactions d'ordres deux et trois issues des quatre éléments non-structuraux. Les courbes 1 et 2, montrent qu'une même influence négative est

enregistrée pour le composant fixé, sous l'effet de la variation du couple de dommage. Exemple, La 1^{ère} interaction illustre l'implication du couple de dommage ($D_{EMR}-D_{EE}$) dans la variation d'effet de D_{EES} sur la réponse D_{ENR} . Pour le couple ($D_{EMR}-D_{EE}$), l'évolution d'une catégorie de dommage très légère à une autre très importante, induit une réduction de l'impact de D_{EES} , sur la réponse D_{ENR} , d'environ 80%. Par contre, les courbes 3 et 4, montrent, qu'un effet stable est obtenu par apport à la variation du niveau de dommage de l'élément fixé, lors de la variation du couple de dommage. Exemple, sous la variation du couple de dommage (allant d'une classe légère D_1 à une classe importante D_5), le D_{ENR} varie de la catégorie D_1 à une catégorie avoisinante D_3 , lorsque D_{EES} est proche d'une catégorie de dommages faible D_1 . Lorsque D_{EES} est proche d'une catégorie de dommage dite très importante « D_5 », la réponse varie d'un degré D_2 à un niveau proche de la classe D_4 .

Au vu des résultats significatifs obtenus, le modèle qui caractérise l'état de l'ensemble des éléments secondaires d'une construction, peut être représenté par l'équation suivante :

$$D_{ENR} = (0.4418125 \times D_{EES}) + (0.4155625 \times D_{ERE}) + (0.2868125 \times D_{EI}) + (0.2081875 \times D_{EEX}) + (0.0119375 \times D_{EES} \times D_{ERE}) + (0.0069375 \times D_{ERE} \times D_{EI}) + (-0.0244375 \times D_{ERE} \times D_{EEX}) + (-0.0793125 \times D_{EES} \times D_{EI}) + (-0.0481875 \times D_{EES} \times D_{EEX}) + (0.0168125 \times D_{EI} \times D_{EEX}) + (-0.0144375 \times D_{EES} \times D_{ERE} \times D_{EI}) + (-0.0055625 \times D_{EES} \times D_{ERE} \times D_{EEX}) + (0.0131875 \times D_{EES} \times D_{EI} \times D_{EEX}) + (0.0144375 \times D_{ERE} \times D_{EI} \times D_{EEX}).$$

III.7.3. Application du PFC pour l'estimation du dommage global

Le degré de dommage global D_G est une combinaison de plusieurs paramètres: l'état du sol de la construction, l'état des constructions avoisinantes, les désordres relevés sur les éléments résistants, les désordres relevés sur les éléments non résistants.

Dans la partie suivante, l'influence des deux paramètres D_{ER} et D_{ENR} est présentée:

- De l'ensemble des éléments structuraux D_{ER} , voir III.7.1.
- De l'ensemble des éléments secondaires D_{ENR} , voir III.7.2.

La démarche utilisée consiste à appliquer, au corpus de données, des traitements autorisant l'accès à une signification répondant à la problématique. Cette analyse peut se formuler à travers deux étapes de sélection:

Par l'exclusion de toutes les fiches (structures), dont la décision finale est liée aux désordres apparus sur le sol (PSC) et/ou dans les constructions adjacentes (PCA). Seules les fiches (constructions) nécessaires dans ce cas d'étude sont conservées.

III.7.3.1. Constructions du PFC dans le cas de l'évaluation des dommages globaux

Cette procédure méthodologique, permet la mise en œuvre d'un plan d'expérience avec deux facteurs D_{ER} et D_{ENR} , à deux niveaux de variation chacun c.-à-d. allons du niveau D_1 à D_5 . Suivant le concept proposé par (Goupy & Creighton 2006), nous obtenons la représentation de l'espace expérimental illustrée par la figure III.14

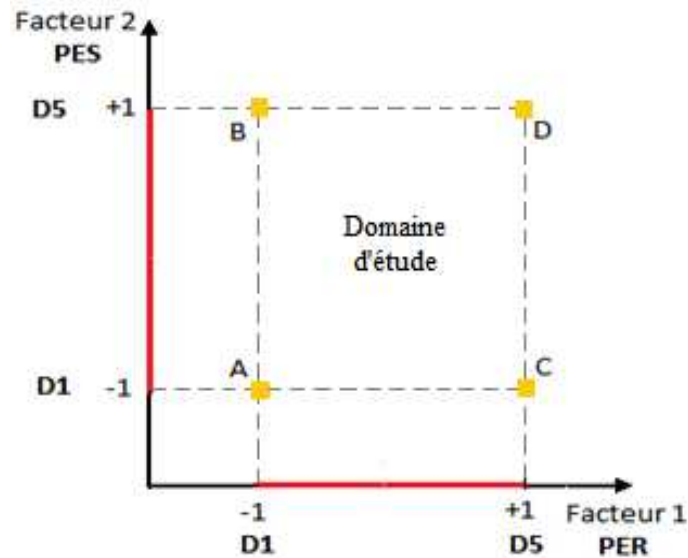


Figure III.14. Représentation du plan d'expérience.

Dans ce système d'axes, chaque point représente une configuration, à savoir :

- Le point A est donné par le niveau bas des deux facteurs,
- Le point D est donné par le niveau haut des deux facteurs,
- Le point B a comme coordonnées, le niveau bas du 1^{er} facteur et le niveau haut du 2^{ème} facteur,
- Le point C est donné par le niveau supérieur du 1^{er} facteur et le niveau inférieur du 2^{ème} facteur.

III.7.3.2. Présentations des résultats

La représentation des réponses nécessite un espace ayant une dimension de plus, que celle de l'espace expérimental (figure III.15) :

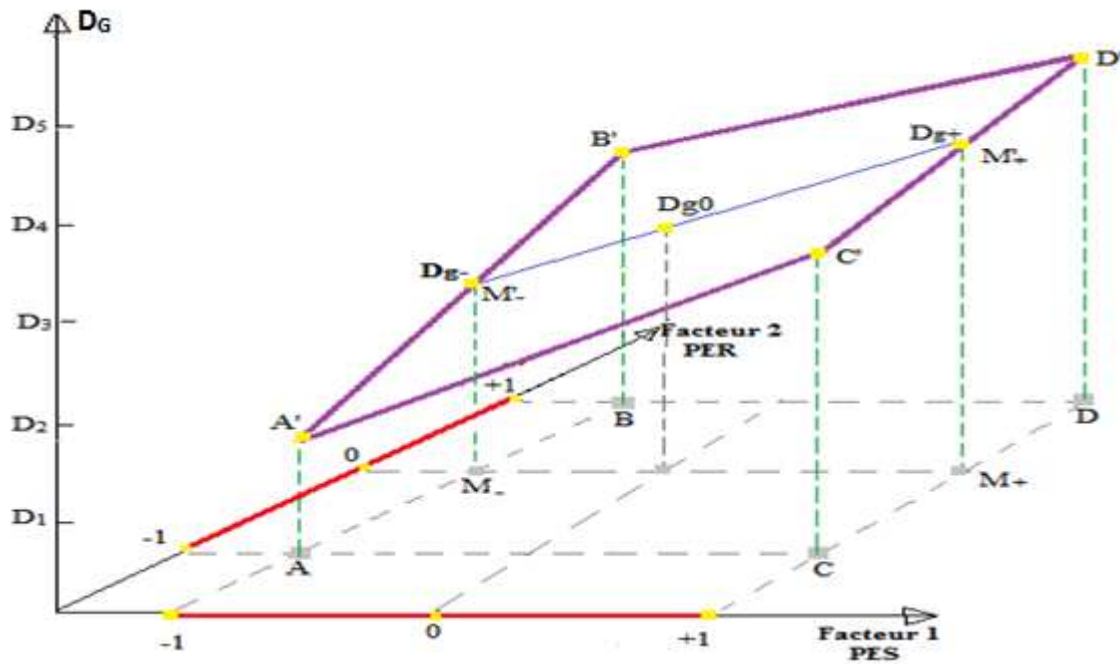


Figure III.15. Représentation des réponses D_G , en divers points du domaine d'étude.

Les réponses obtenues à partir des quatre points (délimitant le domaine d'étude) sont représentées dans le tableau III.8.

Tableau III.8. Les réponses globales.

Point	A	B	C	D
Réponse	D_{G1}	D_{G2}	D_{G3}	D_{G4}
Valeur	2,2	3,03	4,48	4,87

Où D_{G_0} est le dommage global moyen (ou centre du domaine d'étude), donné par la relation (III.12).

$$D_{G_0} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 D_{G_i} \quad (\text{III.12})$$

III.7.3.3. Calcul des coefficients

Pour l'estimation des effets (individuel et combiné) des paramètres (D_{ER} et D_{ENR}) sur la réponse, la démarche utilisée s'appuie d'une part, sur les valeurs présentées dans le tableau III.8., et d'autre part, sur la procédure présentée ci-après:

a- Développement du coefficient relatif au facteur D_{ER}

Considérons les deux points C et D, se trouvant au niveau haut du facteur PES. Leurs coordonnées en unités codées sont:

$$C \begin{cases} X_1 = +1 \\ X_2 = -1 \end{cases} \quad D \begin{cases} X_1 = +1 \\ X_2 = +1 \end{cases}$$

La réponse au point C est D_{G2} . Réponse que l'on peut écrire en remplaçant les niveaux «les unités naturelles » par les unités codées :

$$D_{G2} = C_1 * (+1) + C_2 * (-1) + C_{12} * (-1) \quad (\text{III.13})$$

La réponse au point D est D_{G4} , réponse que l'on peut écrire en remplaçant les niveaux par les unités codées :

$$D_{G4} = C_1 * (+1) + C_2 * (+1) + C_{12} * (+1) \quad (\text{III.14})$$

En additionnant les deux relations (III.12) et (III.13), on obtient :

$$D_{G2} + D_{G4} = 2 C_1 \quad (\text{III.15})$$

Le même calcul est fait pour les points A et B, se trouvant au niveau bas du facteur 1 et où les réponses sont respectivement D_{G1} et D_{G3} :

$$D_{G1} + D_{G3} = -2 C_1 \quad (\text{III.16})$$

La soustraction de ces deux dernières relations (III.15) et (III.16), aboutit à :

$$4C_1 = -D_{G1} + D_{G2} - D_{G3} + D_{G4}$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{D_{G4} + D_{G2}}{2} \right) - \left(\frac{D_{G1} + D_{G3}}{2} \right) \right] \quad (\text{III.17})$$

b- Développement du coefficient relatif au facteur D_{ENR}

Considérons les deux points B et D, se trouvant au niveau haut du facteur PES. Leurs coordonnées en unités codées sont :

$$B \begin{cases} X_1 = -1 \\ X_2 = +1 \end{cases} \quad D \begin{cases} X_1 = +1 \\ X_2 = +1 \end{cases}$$

La réponse au point B est D_{G3} , réponse que l'on peut écrire en remplaçant les niveaux «les unités naturelles » par les unités codées :

$$D_{G3} = C_1 * (-1) + C_2 * (+1) + C_{12} * (-1) \quad (\text{III.18})$$

La réponse au point D est D_{G4} , réponse que l'on peut écrire en remplaçant les niveaux par les unités codées :

$$D_{G4} = C_1 * (+1) + C_2 * (+1) + C_{12} * (+1) \quad (\text{III.19})$$

En additionnant les deux réponses (III.18) et (III.19) :

$$D_{G3} + D_{G4} = 2 C_2 \quad (\text{III.20})$$

Le même calcul a été fait pour les points A et C qui se trouve au niveau bas du facteur 2 et où les réponses sont respectivement D_{G1} et D_{G2} :

$$D_{G1} + D_{G2} = -2 C_2 \quad (\text{III.21})$$

La soustraction de ces deux dernières relations (III.20) et (III.21) :

$$4C_2 = -D_{G1} - D_{G2} + D_{G3} + D_{G4}$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{D_{G3} + D_{G4}}{2} \right) - \left(\frac{D_{G1} + D_{G2}}{2} \right) \right] \quad (\text{III.22})$$

c- Développement du coefficient relatif à l'interaction $D_{ER}-D_{ENR}$

Considérons les deux points C et D, se trouvant au niveau haut du facteur PES. Leurs coordonnées en unités codées sont :

$$B \begin{cases} X_1 = -1 \\ X_2 = +1 \end{cases} \quad C \begin{cases} X_1 = +1 \\ X_2 = -1 \end{cases}$$

La réponse au point B est D_{G3} , réponse que l'on peut écrire en remplaçant les niveaux «les unités naturelles » par les unités codées :

$$D_{G3} = C_1 * (-1) + C_2 * (+1) + C_{12} * (-1) \quad (\text{III.23})$$

La réponse au point C est D_{G2} , réponse que l'on peut écrire en remplaçant les niveaux par les unités codées :

$$D_{G2} = C_1 * (+1) + C_2 * (-1) + C_{12} * (-1) \quad (\text{III.24})$$

Additionnant les deux réponses D_{G2} et D_{G3} :

$$D_{G2} + D_{G3} = -2 C_1 \quad (\text{III.25})$$

Le même calcul est fait pour les points A et D, où les réponses sont respectivement D_{G1} et D_{G4} :

$$D_{G1} + D_{G4} = 2 C_1 \quad (\text{III.26})$$

La soustraction de ces deux dernières relations (III.25) et (III.26) :

$$4C_1 = D_{G1} - D_{G2} - D_{G3} + D_{G4}$$

$$C_{21} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{D_{G4} - D_{G2}}{2} \right) - \left(\frac{D_{G3} - D_{G1}}{2} \right) \right] \quad (\text{III.27})$$

Tableau III.9. Récapitulation des effets.

Facteur	D_{ER}	D_{ES}	D_{ER} et D_{ES}
Effet	Principaux		Interaction
Coefficient	C_1	C_2	C_{12}
Valeur	0,79	0,57	-0,107

III.7.3.4. Signification des effets

a- Signification du coefficient attribué au facteur D_{ER}

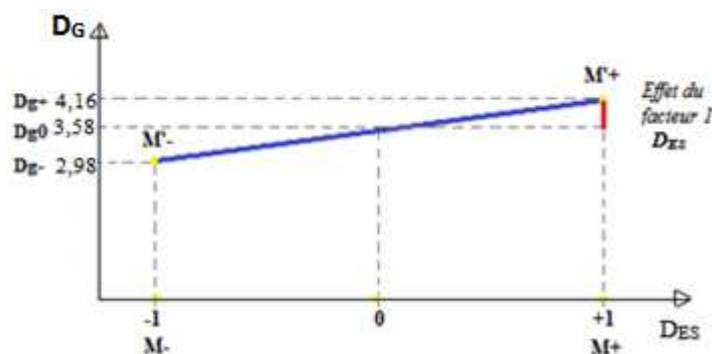


Figure III.16. Représentation de l'effet du paramètre D_{ENR}

Le dommage global varie approximativement de la valeur 2,98 à 4,16, lorsque le dommage local (élément secondaire D_{ENR}) varie d'un niveau de dégât léger D_1 à un niveau traduisant la ruine D_5 .

Par ailleurs, le dommage global augmente du niveau D_{G_0} à D_G^+ pendant que D_{ENR} varie d'une catégorie importante (D_3) à une autre, reflétant l'état de ruine (D_5). Cette augmentation de 0,57 représente l'effet du facteur D_{ENR} (figure III.16)

b- Signification du coefficient attribué au facteur D_{ER}

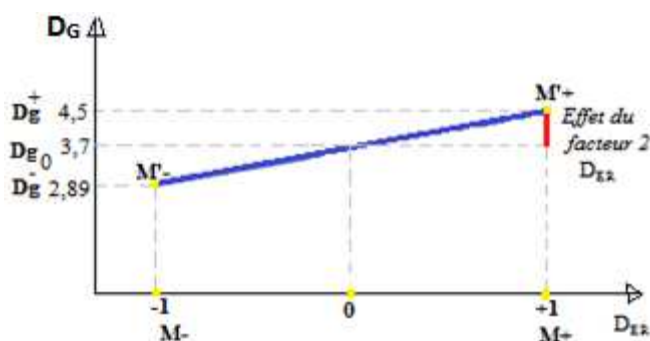


Figure III.17. Représentation de l'effet du paramètre D_{ER}

La variation du niveau de D_{ER} (d'un degré très léger à un autre très élevé), induit une « aggravation » dans la décision finale. En effet, l'appréciation évolue d'un niveau de dommage avoisinant la catégorie dite importante ($2,89=D_3$) à un autre niveau proche de la catégorie indiquant l'état de ruine ($4,5=D_5$).

En moyenne, la valeur D_G évolue de D_{G_0} à D_G^+ , pendant que D_{ER} varie de (D_3) à (D_5). Cet accroissement de 0,79, traduit l'effet du facteur D_{ER} (figure III.17).

c- Signification du coefficient C_{21}

La description du rapport existant entre les deux facteurs, consiste à:

Extraire, les plans ACA'C' (niveau bas du D_{ENR}) et BDB'D' (niveau haut du D_{ENR}) de la figure III.15, Projeter ces derniers, sur un même plans (figure III.15).

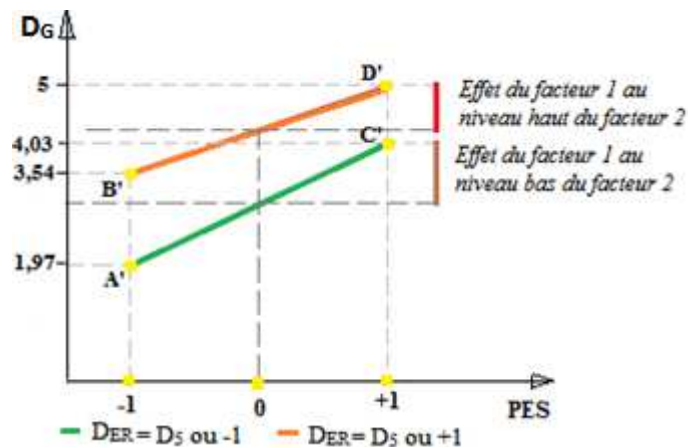


Figure III.18. Illustration de l'interaction entre D_{ENR} et D_{ER}

La figure III.18 indique la corrélation entre les deux facteurs. Celle-ci peut se justifier de la manière suivante :

Lorsque la valeur de D_{ER} est proche du degré (D_1), la variation du niveau minimum au niveau maximum d'endommagement pour l'ensemble des éléments secondaires, induit une variation importante dans la catégorisation du dommage final ($D_G = D_2$ à $D_G = D_4$).

Par contre, lorsque D_{ER} avoisine le degré (D_5), l'évolution des désordres constatés sur l'ensemble des éléments non structuraux (D_1 à D_5) entraîne une variation de la classification finale de la construction.

En effet, l'évolution du D_{ER} inclut une sous-estimation de D_{ENR} , de l'ordre de 70%, dans la prise de décision. Les résultats obtenus sont illustrés par l'équation du modèle mathématique proposé. Ainsi, la réponse globale peut être estimée par l'équation :

$$D_G = 1 + (0.79 * D_{ER}) + (0.57 * D_{ENR}) + (-0.107 * D_{ER} * D_{ENR}).$$

III.8. Comparaison des dommages globaux

La validation des modèles précédemment proposés, est établie en comparant la grandeur D_G calculée à la réponse estimée (réponse donnée dans la fiche), sur un ensemble de dix constructions (tableau III.10.).

Tableau III.10. Les différents niveaux de dommages attribués aux composants.

N° de la construction	Dommages relevés sur les composants							
	Structuraux				Non structuraux			
	D _{EP}	D _{EC}	D _{EPT}	D _{TI}	D _{ESC}	D _{ERE}	D _{EI}	D _{EE}
1	3	4	2	2	3	2	2	2
2	2	4	3	3	4	4	4	4
3	3	1	4	4	4	3	1	3
4	4	3	4	3	3	3	3	4
5	2	2	1	2	2	4	2	1
6	4	4	2	2	4	3	2	2
7	1	1	1	1	3	2	3	4
8	1	1	2	2	3	1	3	4
9	3	3	2	2	2	2	1	4
10	5	2	2	3	3	2	1	4

Les constructions retenues pour la validation du modèle, proviennent des fiches d'évaluation qui n'ont pas été utilisées dans la procédure d'identification (l'établissement des modèles).

Tableau III.11. Validation du modèle proposé.

N° de la construction	Dommage global D _G		Convergence
	Estimé	Calculé	
1	4	3,88	4
2	4	4,27	4
3	4	2	2
4	4	3,70	4
5	4	3,25	3
6	3	4,06	4
7	3	3,16	3
8	2	2,99	3
9	2	3,48	3-4
10	2	3,53	3-4

En se référant aux résultats donnés sur le tableau III.11, il a été constaté que pour les constructions N° 1, 2, 4 et 7, le modèle reproduit la décision de l'expert avec une marge d'erreur insignifiante allant de [3% à 7,5%]. Alors que, pour les constructions N° 5 et 6 le modèle converge sur l'expérimental avec une différence de pourcentage allant de [18,7% à 26,1%], soit une imprécision de ± 1 degré de dommage. Par contre, la plus grande différence est observée sur les constructions N° 3, 8, 9 et 10. Cette divergence de 33,1% à 50% témoigne de l'importance de l'imprécision, soit une erreur de $\pm (2 \text{ ou } 3)$ degrés de dommage.

Malgré qu'une même catégorie de dommage (très importante) ait été attribuée aux 05 premières constructions (tableau III.11.), une différence importante est constatée au niveau des dommages relevés sur les divers éléments (tableau III.10.). À titre d'exemple, la même décision a été prise pour la 1^{ère} et la 5^{ème} construction (vis-à-vis du maintien ou de l'arrêt

d'exploitation). Alors que, dans le détail de l'inspection, un décalage de 20 % en termes d'importance de dégâts a été enregistré sur la 1^{ère} construction par rapport à la 5^{ème}.

III.9. Conclusions

Dans cette partie trois modèles ont été développés, chacun précisant un point particulier :

- L'état de l'ensemble des éléments constituant la structure secondaire nommé D_{ENR} .
- L'état de l'ensemble des éléments composants la structure résistante nommé D_{ER} .
- Une catégorisation de l'état global de la construction.

Sur la base des résultats obtenus, et dans le cas où le dommage est constaté uniquement sur l'un des groupes de composants, on peut proposer que la prise de décision de l'expert s'appuie à:

- 80% sur la situation de la structure résistante, lorsque le dommage est constaté sur ce groupes d'éléments.
- 50% sur la situation de la structure secondaire, lorsque le dommage est constaté sur ce groupe d'éléments.

L'atteinte des deux sous-groupes, implique une sous estimation de leurs effets respectifs dans la prise de décision, car des considérations économiques doivent également être prises en compte.

Chapitre IV

Présentation et Application de la théorie des systèmes experts

Sommaire du chapitre IV

IV.1. Introduction	- 73 -
IV.2. Intelligence artificielle IA.....	- 73 -
IV.2.1. Réseau de neurones artificiels	- 73 -
IV.2.2. La logique floue	- 73 -
IV.2.3. Système à base de règle	- 74 -
IV.2.4. Système expert SE.....	- 74 -
Partie A : Systèmes Experts : aspect théorique.	- 75 -
IV.3. Principe des systèmes experts	- 75 -
IV.4. Domaines recommandés sur l'application des SE.....	- 75 -
IV.5. Historique et évolution des systèmes experts.....	- 75 -
IV.5.1. Les principaux systèmes développés dans le domaine de Génie Civil.....	- 76 -
IV.6. Typologie des systèmes experts	- 76 -
IV.6.1. Système expert dédié.....	- 76 -
IV.6.2. Système expert Shell	- 77 -
IV.7. Les avantages et inconvénients des SE	- 77 -
IV.8. Architecte des SE.....	- 77 -
IV.8.1. Architecture de base d'un SE	- 78 -
IV.8.1.1. La Base de Connaissance (BC).....	- 78 -
a- La Base de faits (BF).....	- 78 -
b- La base de règles (BR)	- 79 -
IV.8.1.2. Le moteur d'inférence (MI).....	- 79 -
a- Les caractéristiques d'un MI	- 79 -
b- Cycles d'un moteur d'inférence.....	- 80 -
IV.8.2. Les composants complémentaires d'un SE.....	- 81 -
IV.8.2.1. Module d'acquisition de connaissances.....	- 81 -
IV.8.2.2. Module d'explication	- 81 -
IV.8.2.3. Module d'interface.....	- 81 -
IV.8.2.4. Module d'ingénierie des connaissances.....	- 81 -
IV.9. Les étapes de réalisation d'un SE.....	- 82 -
IV.9.1. Phase de conception	- 82 -
IV.9.2. Phase d'implantation	- 82 -
Partie B : Description et Conception du système EDPS.....	- 84 -
IV.10. Description du système EDPS.....	- 84 -
IV.10.1. La catégorie utilisateur ordinaire	- 84 -
IV.10.1.1. Les utilisateurs de types propriétaire	- 84 -
IV.10.1.2. Les utilisateurs de type expert	- 84 -
IV.10.2. La catégorie administrateur	- 84 -
IV.10.3. Récapitulatif des utilisateurs.....	- 84 -
IV.11. Diagramme des cas d'utilisation.....	- 85 -
IV.11.1. Séquence d'utilisation par L'Administrateur	- 86 -
a- Premier scénario	- 86 -
b- Deuxième scénario	- 88 -
IV.11.3. Séquences d'utilisation par expert.....	- 90 -
IV.12. Le diagramme de classe	- 91 -
IV.12.1. Le modèle relationnel	- 92 -
IV.13. Conclusions.....	- 92 -

IV.1. Introduction

Ce chapitre est composé de deux parties. Dans la première, nous présentons la théorie de l'intelligence artificielle *IA*. Ensuite, nous présentons la technique des systèmes experts *SE* d'une manière plus détaillée. Quant à la deuxième partie, elle sera entièrement consacrée à la conception de notre système *EDPS* (Évaluation de Dommages Post-Sismique). Nous présentons l'outil, les différents modules le constituant ainsi que les catégories d'utilisations.

IV.2. Intelligence artificielle *IA*

Au sens large, l'*IA* est le domaine de l'informatique qui vise à créer des machines pouvant adopter des comportements que l'homme considère comme intelligents (Devyatkov 2001). Il s'agit de faire en sorte que les ordinateurs agissent davantage comme des êtres humains.

L'*IA* englobe plusieurs branches (figure IV.1), les plus utilisées de nos jours sont : les réseaux neuronaux, la logique floue, les systèmes experts ou systèmes basés sur les connaissances, système à base de règles ... etc.

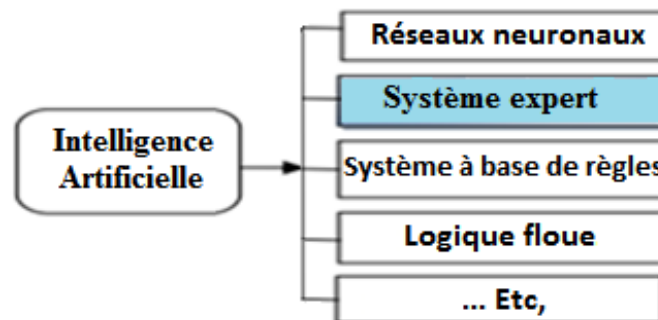


Figure IV.1. Les différentes branches de l'intelligence artificielle (Zadeh 1999).

IV.2.1. Réseau de neurones artificiels

Un réseau de neurones est une conception inspirée du fonctionnement des neurones biologiques, et qui par la suite s'est rapproché des méthodes statistiques. Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type probabiliste, en particulier bayésien (Hopfield 1982). Ces approches peuvent être classées comme des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes permettant de créer des classifications rapides d'une part, et d'une autre part, comme des méthodes de l'*IA* auxquelles ils fournissent un mécanisme indépendant des idées propres du programmeur (Khare & Shiva 2007).

IV.2.2. La logique floue

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques (Elenas et al. 2013). La logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qu'elle utilise, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes (Faust 2002). Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel.

IV.2.3. Système à base de règle

Les systèmes à base de règles sont utilisés comme moyen de stocker et de manipuler des connaissances pour interpréter les informations de manière utile. Le terme «système basé sur des règles» s'applique aux systèmes impliquant des règles conçus par l'homme. Ces systèmes sont construits à l'aide de l'inférence de règle automatique, tels que l'apprentissage automatique à base de règles (Jackson 1998).

IV.2.4. Système expert *SE*

Un *SE* est un programme informatique qui fournit à l'utilisateur des conseils ou des recommandations sur le domaine désigné, comme le ferait un ou plusieurs experts. Dans un tel programme informatique, l'expertise humaine dans le domaine est bien représentée et sauvegardée sous la forme d'une base de connaissances. Il est également appelé système expert basé sur les connaissances, systèmes d'aide à la décision ou systèmes intelligents (Jackson 1998). Nombreux sont ceux qui s'accordent pour dire que le domaine des *SE* est celui qui a progressé le plus et qui a eu le plus de succès dans l'application de méthodes d'IA à des problèmes réels (Devaytkov 2001; Badiru & Cheung 2002; Kendal & Green 2007).

Partie A : Systèmes Experts : aspect théorique.**IV.3. Principe des systèmes experts**

La principale particularité de ce genre de système, est le fait que les connaissances du domaine (faits et règles) sont isolées du reste des composants, ce qui fait du *SE* un système basé sur la connaissance (figure IV.2). En s'appuyant sur les connaissances fournies, le système fiabilise l'enchaînement approprié pour arriver à la solution, ainsi les connaissances sont déclarées d'une manière autonome et écrites indépendamment de leurs utilisations (Furuta et al. 1991).



Figure IV.2. Schéma simplifié illustrant le principe des *SE*.

IV.4. Domaines recommandés sur l'application des SE

Un *SE* peut être conçu dans tout domaine où une expertise humaine est prouvée (Badiru & Cheung 2002). Les domaines d'applications des *SE* sont principalement les suivants :

- *Analyse de situation* : expertise bancaire, financière, juridique, économique... etc.,
- *Diagnostic* : diagnostic des pannes, diagnostic médical, maintenance... etc.,
- *Aide à la décision* : identification, classification... etc.,
- *Procédures* : aide à la mise en place et au suivi de procédures industrielles, administratives, comptables, organisationnelles ... etc.,
- *Contrôle de Processus* : contrôle "intelligent" de processus industriels.
- *Formation* : Enseignement assiste par ordinateur.

IV.5. Historique et évolution des systèmes experts

Le premier *SE* fut Dendral en 1965, créé par les informaticiens Edward Feigenbaum et Bruce Buchanan, le médecin Joshua Lederberg et le chimiste Carl Djerassi (Badiru & Cheung 2002). Le plus connu de ces systèmes est Mycin, système de diagnostic de maladies du sang et de prescription de médicaments. Créé en 1973, ce système se caractérise d'un vrai moteur d'inférence et d'une vraie base de règles. Cependant, ses règles étaient affectées de coefficients de vraisemblance qui donnaient à chacune d'entre elles un poids particulier face aux autres. Le moteur d'inférence produisait un chaînage avant simple tout en calculant les probabilités de chaque déduction, ce qui le rendait incapable d'expliquer la logique de son fonctionnement et de détecter les contradictions.

IV.5.1. Les principaux systèmes développés dans le domaine de Génie Civil

La plupart des *SE* développés dans le domaine du Génie Civil ont pour but de répondre aux problèmes de prise de décision. Parmi ces systèmes, ceux présentés dans le tableau IV.1 sont les plus récents.

Tableau IV.1. Présentation de quelques *SE* développés dans le domaine de Génie Civil.

Auteur et année	Titre	Domaine d'étude
Chassiakos et al. (2005).	A knowledge-based system for maintenance planning of highway concrete bridges.	La sélection de la méthode de maintenance des ponts.
Hamizi et al. (2008).	Conception et réalisation d'un système d'aide à l'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant.	Evaluation de la vulnérabilité des structures existantes
Golabchi. (2008).	A knowledge-based expert system for selection of appropriate structural systems for large spans.	Choix de système de construction.
Churilov (2009).	Expert system for seismic vulnerability assessment of masonry structures.	Vulnerability assessment of existing structures
Yousif et al (2012).	Using the knowledge-based system (KBS) to improving system for crack diagnosis in r.c column.	Identification et caractérisation des fissures.
Cacciotti et al. (2013).	Knowledge-based system for documentation and mitigation of damages in historical structures.	Inspection des dommages sur les structures historiques.
Mancy Mosa et al. (2013).	An educational knowledge-based system for civil engineering students in cement concrete construction problems.	Source de documentation pour les étudiants de génie civil.
Taillandier et al. (2013).	Aide au choix pour la réhabilitation thermique de maisons individuelles via un système expert.	Rehabilitation thermique des maisons
Mehrbakhsh Nilashi et al. (2015).	A knowledge-based expert system for assessing the performance level of green buildings.	Inspecté la performance des bâtiments.
Tintu Mary et al. (2016).	Knowledge based expert system for the selection of retaining walls.	La sélection des murs de soutènements.
Barkavi and Natarajan (2018).	Knowledge-based decision support system for identification of crack causes in concrete buildings.	Identification et caractérisation des fissures.

IV.6. Typologie des systèmes experts

Il existe deux types de *SE* :

IV.6. 1. Système expert dédié

C'est un *SE* relatif à un domaine d'expertise particulier, il comprend une base de connaissance et un moteur d'inférence adéquat (Sajja & Akerkar 2010).

Exemple :

- MYCIN : pour le diagnostic médical des maladies du sang ;
- PROSPECTOR : pour la prospection minière.

IV.6. 2. Système expert Shell

Un Shell est un environnement de développement de *SE* particuliers. Il comprend essentiellement un langage de représentation de connaissances et un moteur d'inférences (Sajja & Akerkar 2010).

Exemple :

- VP-EXPERT : il est très répandu grâce à sa simplicité d'utilisation.

IV.7. Les avantages et inconvénients des SE

Les *SE* offrent un moyen de capturer l'expertise humaine et fournissent un environnement permettant à ces connaissances de s'améliorer et de se développer (Kkaetzel & Clifton 1995 ; Devyatkov 2001). Les avantages des *SE* sont:

- La connaissance est plus explicite, accessible et extensible. On peut trouver une similitude entre les *SE* et le processus de raisonnement humain.
- La base de connaissances peut être développée progressivement sur une longue période. La modularité du système permet une expansion et un raffinement continu de la base de connaissances.
- Un *SE* n'est pas partial et ne prend pas de décisions superficielles ou irrationnelles. Il utilise une approche systématique pour trouver la réponse au problème.

Bien que les *SE* présentent de nombreux avantages, les inconvénients suivants peuvent être notés:

- Ils ne possèdent pas la capacité d'apprendre.
- Ils manquent de bon sens et d'intuition.
- Les connaissances stockées dans les *SE* en général sont limitées lorsqu'elles représentent l'expertise d'un expert ou d'un petit nombre d'experts.

IV.8. Architecte des SE

Les *SE* se caractérisent avec deux catégories différentes de composants. La première dite principale, ses composants sont indispensables pour le fonctionnement du système, alors que la deuxième dite secondaire, ses composants sont facultatifs au fonctionnement du système (Figure IV.3).

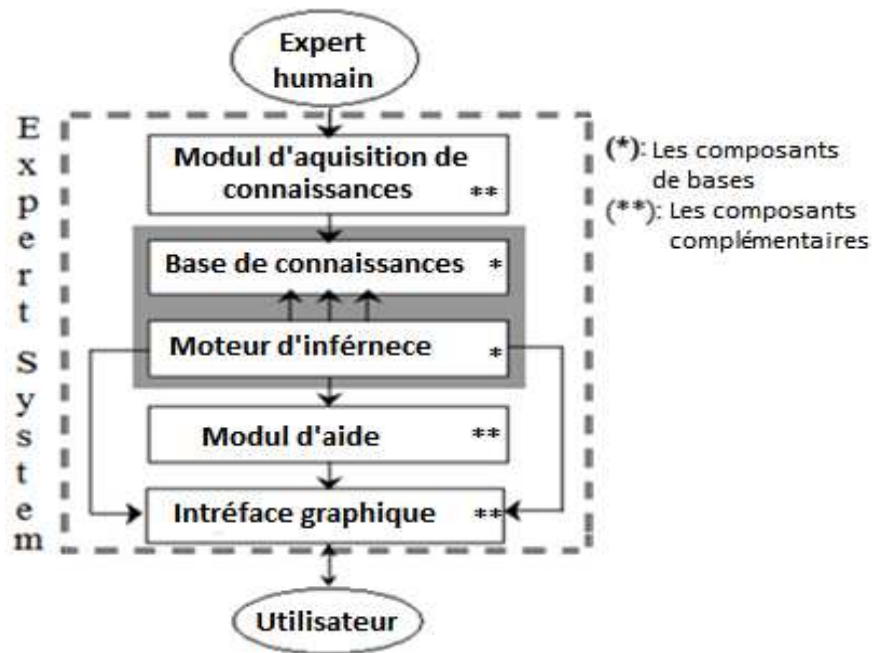


Figure IV.3. Architecture complète d'un SE (Shen et al. 2010).

IV.8.1. Architecture de base d'un SE

Un système de ce type, comprend généralement deux éléments principaux : une base de connaissances (BC) et un mécanisme dit moteur d'inférence (MI) (Sajja & Akerkar 2010).

IV.8.1.1. La Base de Connaissance (BC)

Elle contient une base de faits (BF) et une base de règles (BR), représentant respectivement le savoir (faits) et le savoir-faire (les règles de l'expert) (Shen et al. 2010). La BF intègre deux types de faits : des faits permanents et des faits déduits par le MI qui sont propres au cas traité (Gregor 2001).

a- La Base de faits (BF)

La BF est l'une des entrées d'un MI. C'est un ensemble de connaissances appelées "faits", considérés comme vrais.

- Les faits inférés

Le MI est capable d'utiliser des faits et des règles pour produire de nouveaux faits, jusqu'à parvenir à la réponse de la question posée par l'expert (Raza 2009).

- Les faits initiaux

Sont tous les faits introduits initialement dans la BC de l'outil. Ils sont exploités par le MI pour tirer des conclusions ou développer de nouveaux faits (Barkavi & Natarajan 2018).

b- La base de règles (BR)

Il s'agit de la partie dynamique et fondamentale de la BC (Gregor 2001). Cette base contient l'ensemble des règles de production pouvant être appliqués aux faits pour déduire de nouveaux faits non existant préalablement dans la BF. En effet, un SE peut démarrer sans raisonnement c.-à-d. avec une BF vide, mais il ne peut faire aucun pas de raisonnement si sa BR ne contient aucune règle.

IV.8.1.2. Le moteur d'inférence (MI)

C'est un programme chargé d'exploiter la BC pour mener un raisonnement sur le problème posé en fonction du contenu de la BF. Pour ce faire, il contient un algorithme qui examine les conditions de règles et vérifie si elles sont vraies ou fausses (Kendal & Creen 2007). L'algorithme peut fonctionner suivant trois modèles de raisonnement ; en chainage avant, en chainage arrière ou bien en chainage mixte (Khan et al. 2011).

a- Les caractéristiques d'un MI

Les MI se distinguent par leur mode d'invocation des règles. Ainsi, ils peuvent être classés en 3 catégories :

- Les MI à chainage avant : raisonnement guidé par les données

Un MI à chainage avant détermine le résultat (ou le but) à partir de la BF. Les règles à déclencher à chaque cycle sont celles dont les prémisses appartiennent à la BF. L'exécution de ces règles modifie la BF et d'autres règles peuvent alors être déclenchées au cycle suivant. Ce principe sera répété jusqu'à ce que le but soit dans la BF (Sajja & Akerkar 2010).

- Les MI à chainage arrière : raisonnement guidé par le but

Un MI à chainage arrière détermine l'ensemble des règles qu'il faut invoquer pour aboutir au but (fait à établir). Au début, le but sera placé dans la mémoire de travail du système, puis le système cherche dans sa BC les règles dont la conclusion correspond au but posé (Voyer 1992). Le fonctionnement de ce mode de chaînage commence par une liste d'objectifs ou d'hypothèses et fonctionne à l'envers, de la conséquence à l'antécédent, pour voir s'il y a des données disponibles qui soutiennent l'une de ces conséquences (Sajja & Akerkar 2010). Aussi, à l'aide de ce mode de chainage, le MI pourrait chercher l'inférence des règles jusqu'à ce qu'il trouve celui qui a une conséquence correspond à

l'objectif désiré. Si l'antécédent de cette règle n'est pas connu pour être vrai, alors il est ajouté à la liste des objectifs.

- *Les MI à chaînage mixte*

Ils utilisent une combinaison de ces deux approches *chaînage avant* et *chaînage arrière*. Ce type de MI peut être choisi lorsqu'une partie des faits du problème est à établir, et l'autre partie est considérée déjà établie. Les conditions de déclenchement des règles dans ce cas peuvent porter sur les deux types de faits (Sajja & Akerkar 2010). Donc, pour résoudre le problème, on sera amené à prendre en considération les faits déjà établis et de remplacer le problème à résoudre par une liste de sous problèmes.

b- *Cycles d'un moteur d'inférence*

Le MI enchaîne une séquence de cycles au cours de son raisonnement jusqu'à aboutir au résultat désiré ou jusqu'à saturation. Un cycle du MI est composé de deux phases, à savoir, une phase d'évaluation et une phase d'exécution (Merritt 2001).

- *La phase d'évaluation*

Pendant cette phase, le MI essaye de dégager l'ensemble des règles qui peuvent être tirées ou déclenchées à la phase suivante (Merritt 2001). Cette phase d'évaluation est effectuée en 3 étapes :

La sélection ou la restriction : Dans cette étape, le MI détermine un sous ensemble de règles et de faits dans lequel il est probable de trouver la solution. Dans ce cas, la BC est supposée être décomposée en des sous ensembles ou groupes de domaines distincts.

Filtrage ou génération de conflits : Dans cette étape, le MI fait la sélection des règles qui peuvent effectivement être déclenchées. Au final, un sous ensemble de règles appelé *ensemble de conflits* est obtenu.

Résolution de conflits : Dans cette étape, le MI fait le tri des règles déjà sélectionnées, et choisi la première règle (ou les premières règles) à déclencher.

- *La phase d'exécution*

Dans cette phase, le MI déclenche les règles dernièrement sélectionnées. Ainsi, si le but est atteint, la recherche est arrêtée et les nouveaux faits résultants seront ajoutés à la BF, sinon, il recommence un nouveau cycle (Merritt 2001), tel qu'illustré dans la figure IV.4.

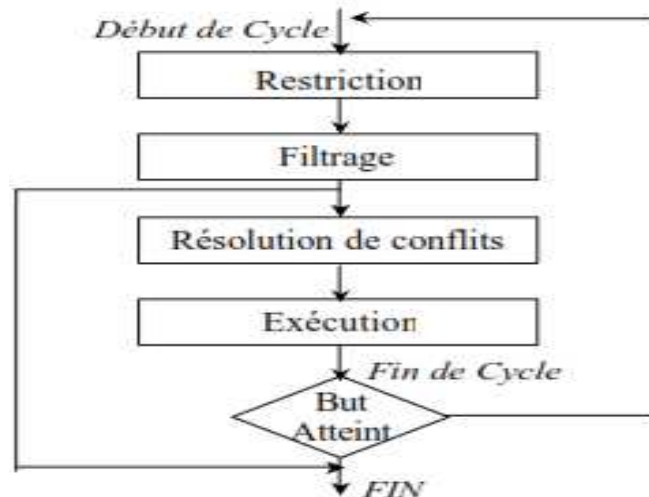


Figure IV.4. Le cycle d'un moteur d'inférence (Merritt 2001).

Généralement cette phase consiste à ajouter des faits à la BF, mais il est aussi possible d'en retirer d'autres, de déclencher des réactions ou exécuter des tâches supplémentaires.

IV.8.2. Les composants complémentaires d'un SE

Sachant que l'objectif du SE est d'aider l'utilisateur à résoudre les problèmes de prise de décision, il doit contenir des modules supplémentaires pour faciliter la compréhension. Parmi ces modules, les plus courants sont:

IV.8.2.1. Module d'acquisition de connaissances

L'installation d'acquisition de connaissances est chargée de fournir les connaissances à la base de données dans un SE (Churilov 2009). L'édition des connaissances peut être réalisée de deux manières: soit par l'ingénieur des connaissances, soit par le SE lui-même pour générer et modifier le fichier de règles (Mansiya et al. 2014).

IV.8.2.2. Module d'explication

Pour chaque tâche effectuée par l'outil et pour toute solution proposée, ce module peut fournir à l'utilisateur les explications appropriées (Sajja & Akerkar 2010).

IV.8.2.3. Module d'interface

L'interface gère le dialogue entre l'utilisateur et le système. Il fournit des simplicités telles que : des menus, de l'aide, des raccourcis etc. (Sajja & Akerkar 2010).

IV.8.2.4. Module d'ingénierie des connaissances

L'ingénierie de connaissances peut être représentée par toute personne impliquée dans le développement du SE, à savoir ; l'expert du domaine, l'utilisateur, le personnel de maintenance ... etc., (Sajja & Akerkar 2010).

IV.9. Les étapes de réalisation d'un SE

IV.9.1. Phase de conception

Comme pour le développement de tout logiciel, il est nécessaire de passer par une phase de conception. Pendant cette phase, tous les éléments de l'application et le raccordement logique entre eux seront dégagés. Aussi, les besoins et le type d'entrées/sorties nécessaire à l'application seront déterminés; quel type de problèmes peut rencontrer l'utilisateur, comment peut-il formuler ses besoins à l'ordinateur et quel genre de réponse souhait-il obtenir (Churilov 2009). Ainsi, comme le montre la figure IV.5, le développeur peut donner un plan d'action sous forme d'un ensemble d'étapes à réaliser.

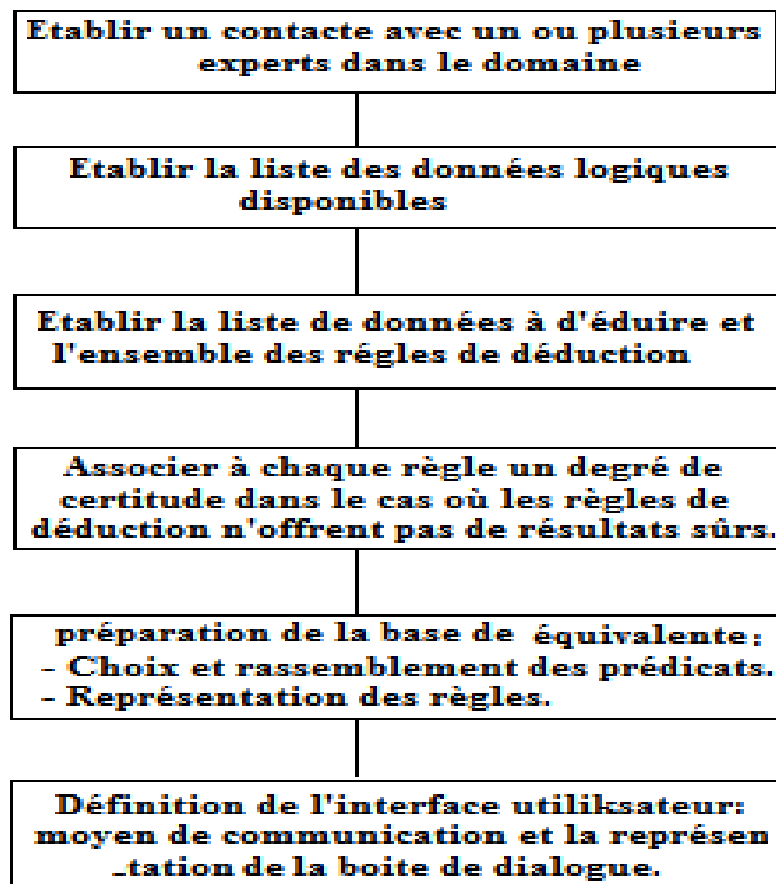


Figure IV.5. Schéma explicatif définissant les différentes étapes de la phase de conception (Kendal & Creen 2007).

IV.9.2. Phase d'implantation

La partie critique et la plus intéressante dans un SE est son noyau (BC + MI). Pour développer un SE, il est indispensable d'utiliser un système qui offre au minimum un moyen souple de représentation de connaissances. Deux choix se présentent, à savoir :

Le premier choix consiste à utiliser un langage disposant déjà : d'un MI indépendant et d'une souplesse de représentation de connaissances (Kendal & Creen 2007).

Le deuxième choix consiste à utiliser un langage spécifique à l'IA. Celui-ci permet de faire un choix approprié du MI à utiliser et de la méthode de représentation de la connaissance. Dans ce cas, le programmeur doit réaliser en premier lieu un MI, ensuite une implémentation adéquate de la BC (Kendal & Creen 2007). Ce choix nécessite une bonne maîtrise de la structure des MI mais possède l'avantage de l'adaptabilité aux besoins et au type de l'expertise à implanter.

Partie B : Description et Conception du système *EDPS*

IV.10. Description du système *EDPS*

L'*EDPS* est un outil informatique qui permet d'évaluer les dommages post-sismique. Ainsi, il peut fournir un soutien rigoureux et transparent aux divers utilisateurs (experts, ingénieurs, ... etc.), et aussi un moyen de sensibiliser les propriétaires sur l'importance du danger auquel ils sont exposés. Le système *EDPS* est doté de quatre modules permettant de faciliter son utilisation, à savoir ; un module d'aide, un module d'explication, un module d'interface et un module d'acquisition de connaissances. Aussi, comme tout système expert, *EDPS* s'adresse à deux catégories d'utilisateurs; une réservée, aux utilisateurs ordinaires (propriétaire et ingénieur non expert ou expert) et une autre aux administrateurs de l'*EDPS*.

IV.10.1. La catégorie utilisateur ordinaire

Ce sont les consommateurs du logiciel qui posent leurs problèmes au système. Ils sont classés en deux sous-catégories :

IV.10.1.1. Les utilisateurs de types propriétaire

Les citoyens, ou bien le grand public;

IV.10.1.2. Les utilisateurs de type expert

Ce sont les personnes chargées par les autorités de gestion des situations post-catastrophe pour expertiser les constructions.

IV.10.2. La catégorie administrateur

Ce sont les personnes qui sont habilitées de modifier non-seulement les connaissances implémentées dans l'*EDPS*, mais aussi ont la faculté d'ajouter ou de supprimer les utilisateurs de type expert.

IV.10.3. Récapitulatif des utilisateurs

La définition des catégories d'utilisations d'*EDPS* (schéma au niveau de la figure IV.6.) est établie suivant l'orientation donnée par (Mansiya et al. 2014) :

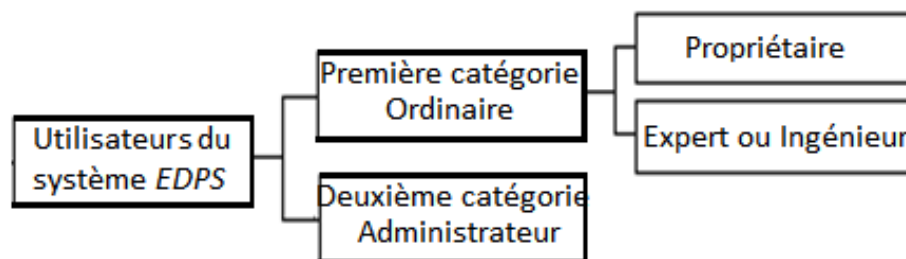


Figure IV.6. Différentes catégories d'utilisateurs du système *EDPS*.

IV.11. Diagramme des cas d'utilisation

Tout système peut être décrit par un certain nombre de cas d'utilisation correspondant aux besoins exprimés par l'ensemble des utilisateurs. À chaque utilisateur, correspondra un certain nombre de cas d'utilisation du système. L'ensemble de ces cas sont représentés sous forme d'un diagramme appelé diagramme de cas d'utilisation. La figure IV.7 illustre le diagramme de cas d'utilisation du système *EDPS*.

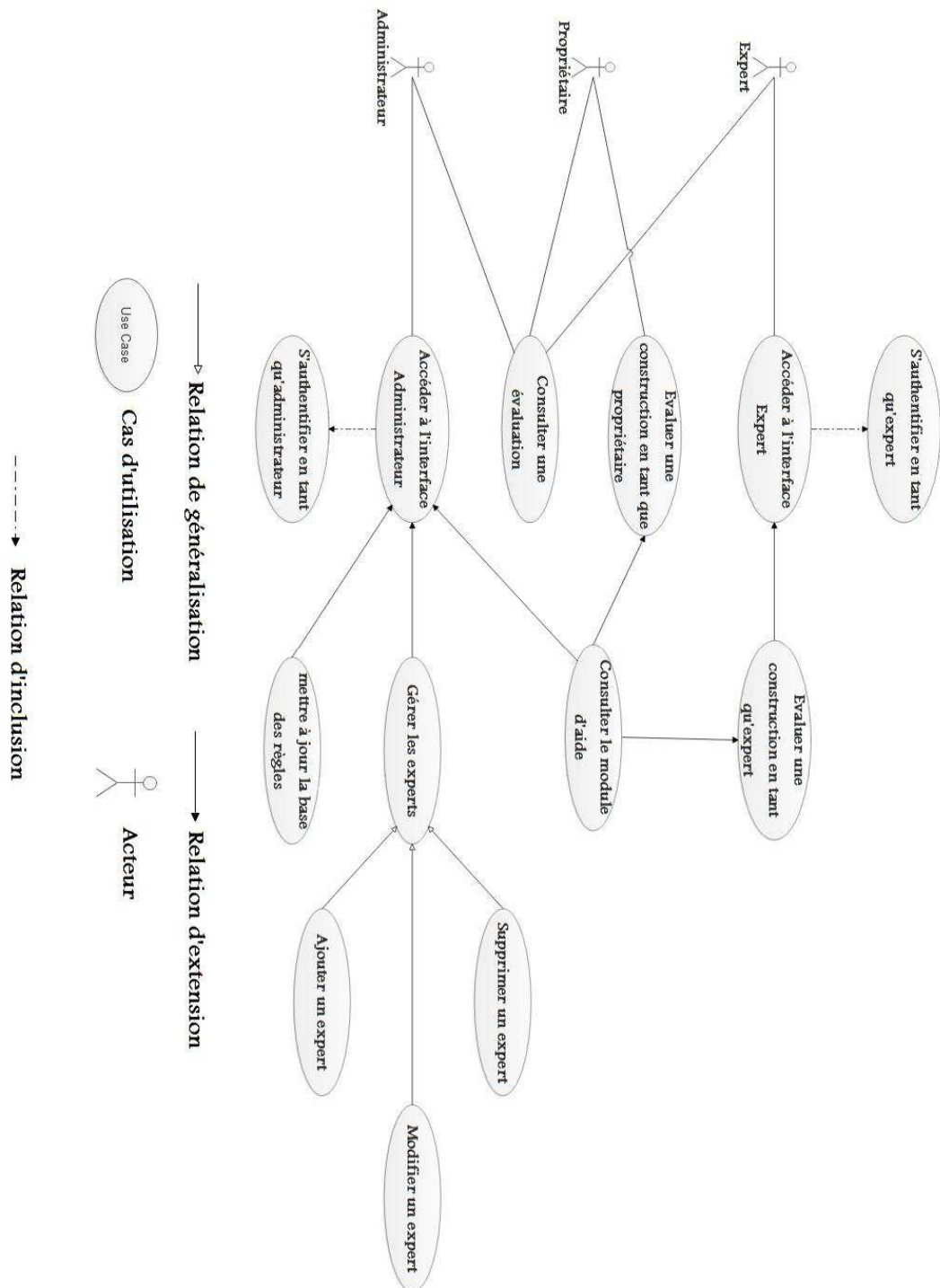


Figure IV.7. Diagramme de cas d'utilisation global du système *EDPS*.

IV.11.1. Séquence d'utilisation par L'Administrateur

Tel que présenté ci-dessus, dans le cas d'utilisation par Administrateur, deux scénarios sont envisageables, le première dit principal, est dans l'objectif de gérer la base de connaissances et l'actualisation de la liste d'experts, le deuxième dit secondaire, crée dans le but de vérifier et d'exploiter les inspections menées par les deux types d'utilisateurs. Deux scénarios peuvent se présenter :

a- Premier scénario

Pour des raisons de sécurité, avant toute action, l'introduction d'informations justifiant le statut de l'administrateur est indispensable. Ainsi, l'administrateur doit introduire un mot de passe et un nom d'utilisateur. A cet effet, un récapitulatif des différentes étapes d'authentification de l'administrateur est illustré par la figure VI.8.

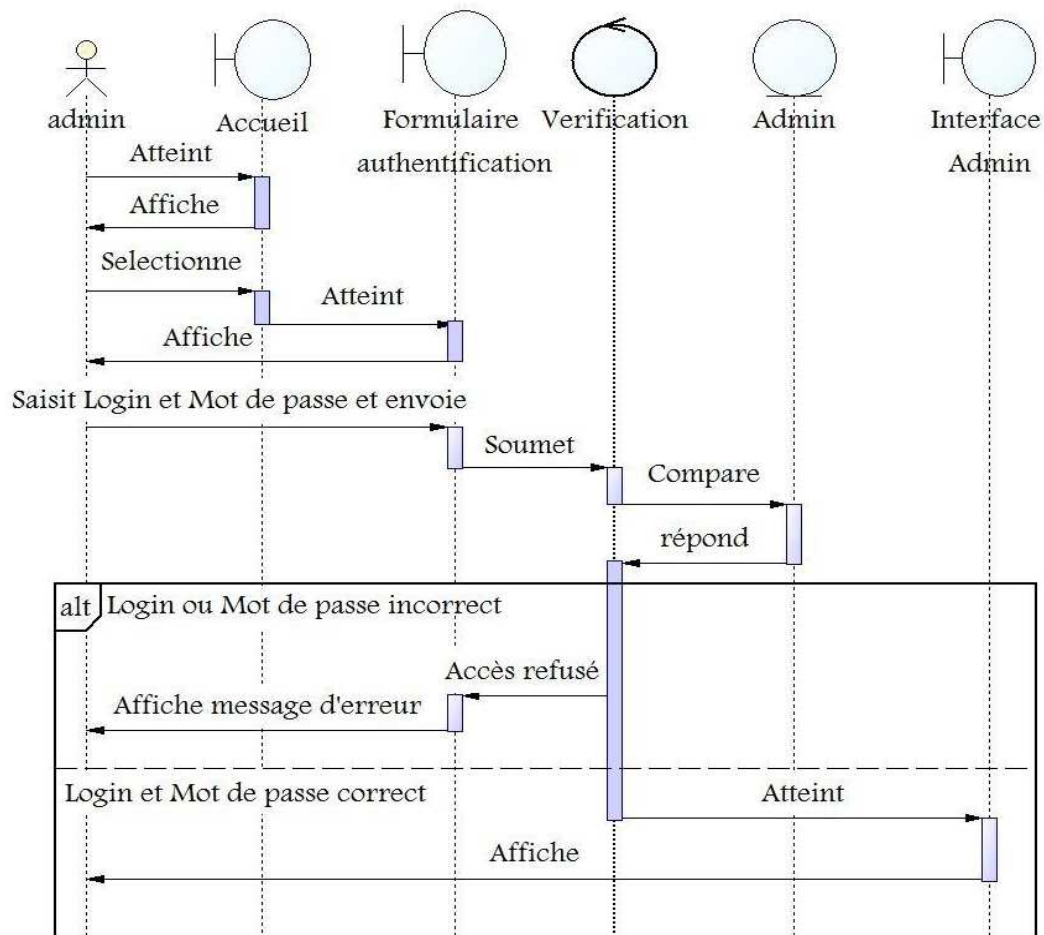


Figure IV.8. Diagramme de séquence de cas d'utilisation «S'authentifier en tant qu'administrateur».

Le cheminement des étapes du premier scénario :

- En exécutant le système *EDPS*, l'administrateur accède à l'interface d'accueil, puis demande son espace en cliquant sur le bouton «Admin» (voir figure IV.9 et IV.10);

- Le système lui retourne un formulaire d'authentification;
- L'administrateur remplit le formulaire puis le valide en cliquant sur le bouton «login»;
- Le système vérifie la validité des informations reçues et redirige vers l'espace administrateur, sinon il retourne un message d'erreur.

Après authentification, le gestionnaire de l'EDPS accède à l'interface qui lui permet d'entamer ses tâches. Parmi les étapes qui peuvent être effectuées à ce niveau, certaines d'entre elles sont présentées par le diagramme de classe donné par la figure IV.9.

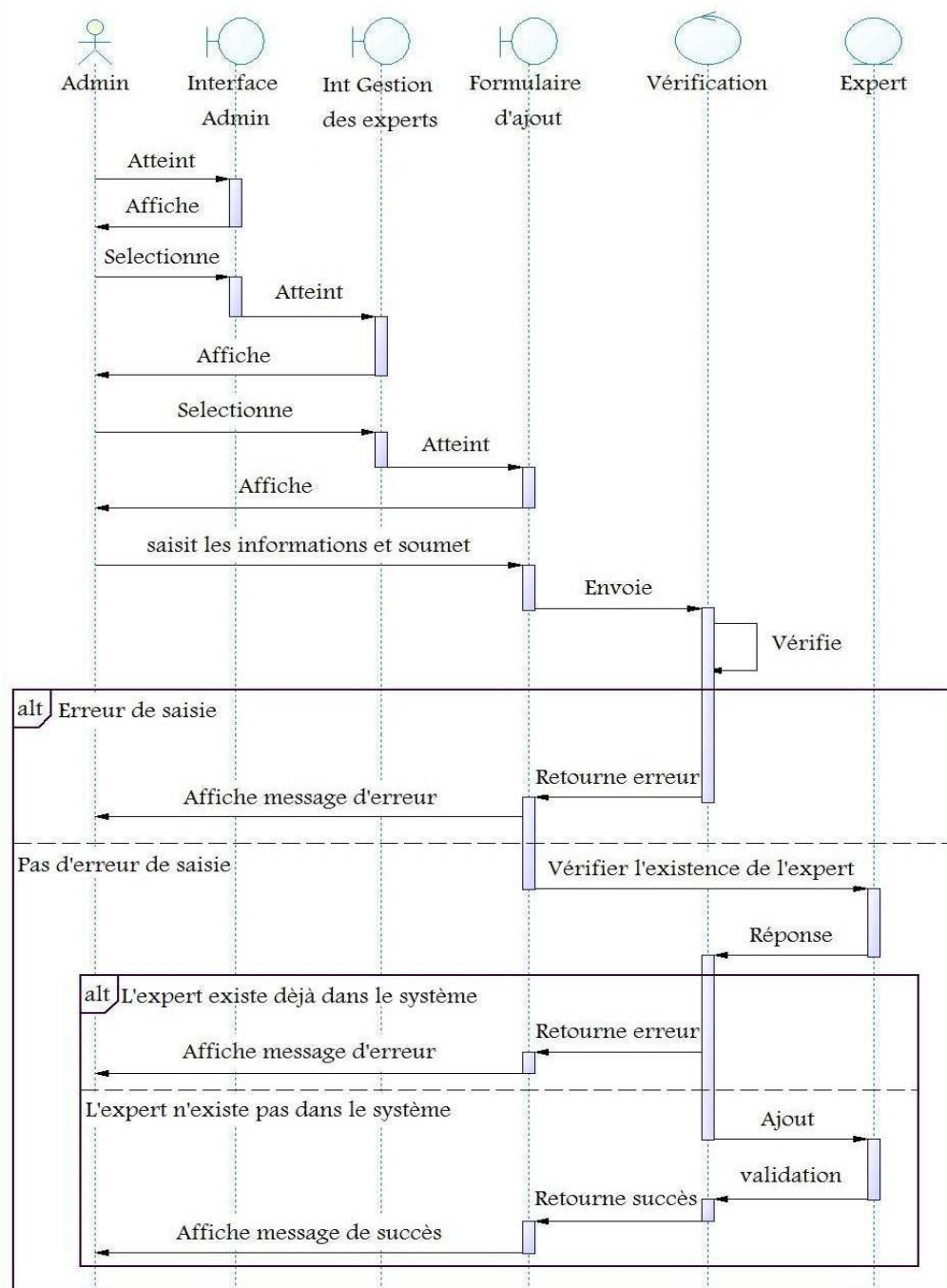


Figure IV.9. Diagramme de séquence de cas d'utilisation «ajouter un expert».

Le cheminement des étapes du premier scénario :

- Après authentification, l'administrateur demande l'interface «Gestion des Experts» en cliquant sur le bouton «Gestion Experts»;
- Le système lui retourne l'interface «Gestion des Experts» ;
- L'administrateur demande le formulaire d'ajout en cliquant sur le bouton «Ajouter Expert»;
- Le système lui retourne le formulaire ;
- L'administrateur remplit le formulaire et valide l'opération ;
- Le système vérifie les données saisies puis vérifie l'inexistence de cet expert dans la base de données, si c'est le cas, le système enregistre le nouvel expert dans la base de données et affiche un message de succès, sinon il affiche un message d'erreur.

b- Deuxième scénario

Durant cette phase, l'administrateur peut consulter les différentes inspections menées par l'expert et/ou le propriétaire. Ainsi, cela lui permettrait de tirer des conclusions qui vont lui permettre d'une part, d'apporter des corrections et des améliorations à l'outil et d'une part à l'actualisation des règlements.

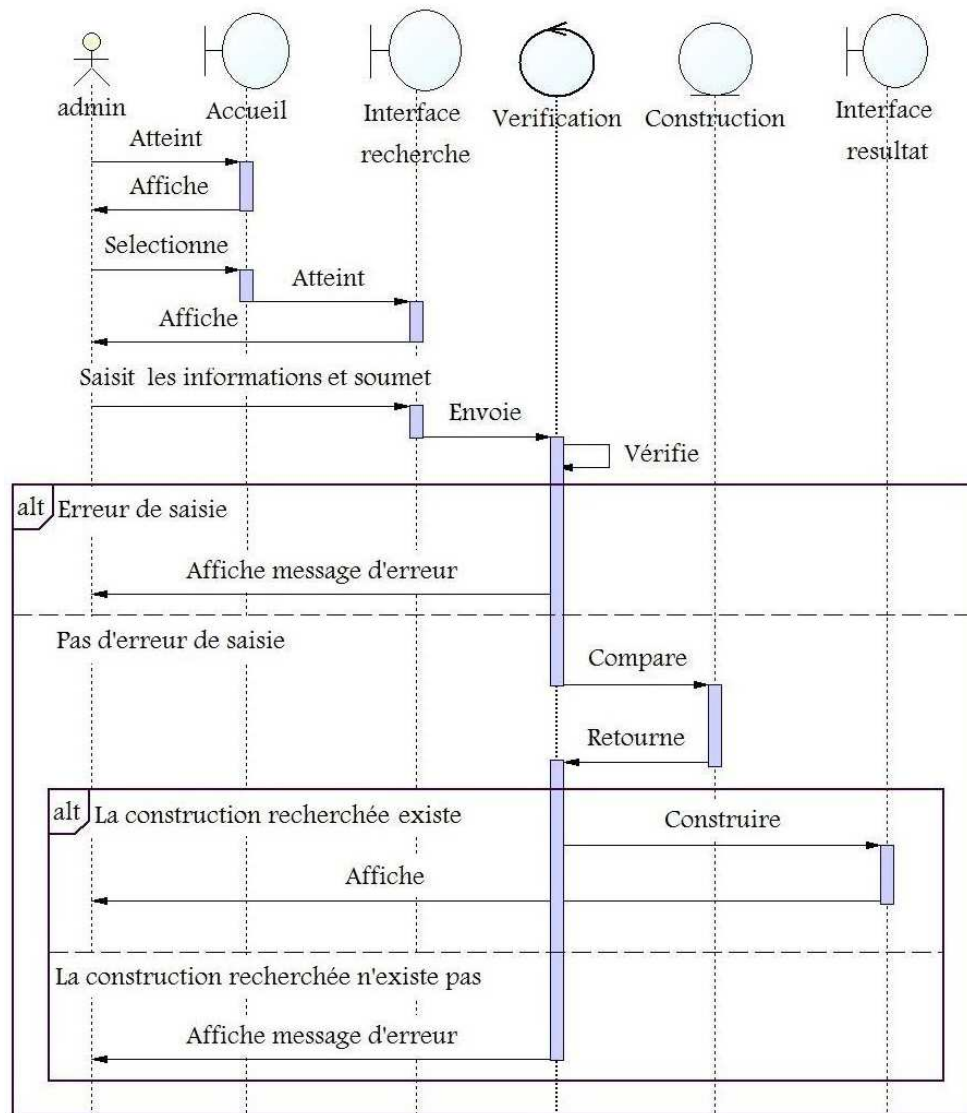


Figure IV.10. Diagramme de séquence de cas d'utilisation «consulter une évaluation».

Le cheminement des étapes du deuxième scénario :

- L'administrateur accède à l'interface d'accueil en exécutant l'EDPS puis demande l'interface recherche en cliquant sur le bouton « recherche » ;
- Le système lui retourne l'interface recherche contenant un formulaire ;
- L'administrateur remplit le formulaire et valide l'opération ;
- Le système vérifie les données saisies et retourne l'interface résultat. Si cette construction existe, l'outil affiche un message d'erreur dans le cas contraire.

IV.11.3. Séquences d'utilisation par expert

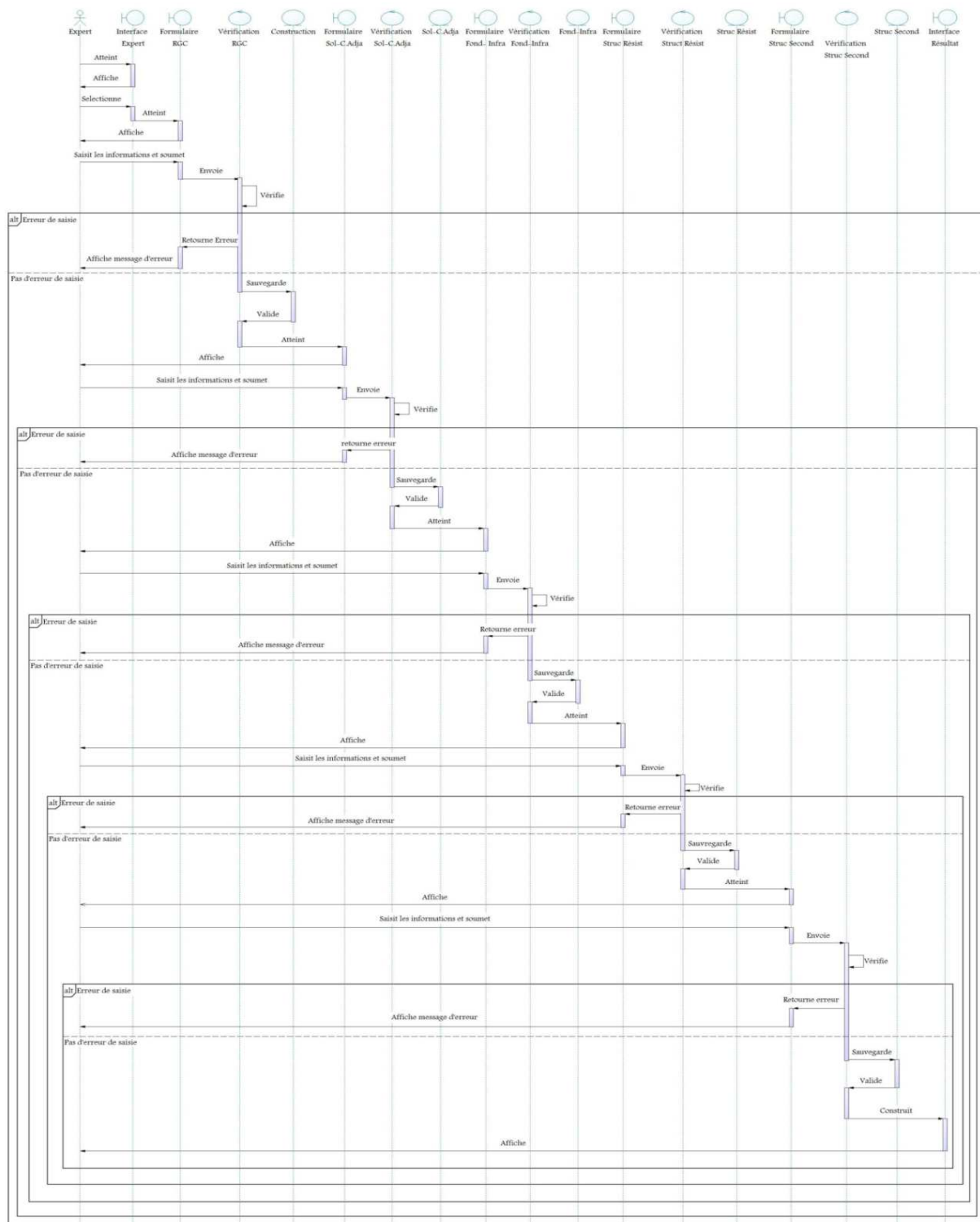


Figure IV.11. Diagramme de séquence de cas d'utilisation «évaluer une construction en tant qu'expert».

Cheminement des étapes du cas d'utilisation par expert :

- Une fois accédé à son espace, l'expert demande l'évaluation d'une nouvelle construction en cliquant sur le bouton «nouvelle évaluation» ;

- Le système lui retourne l'interface RGC (renseignements généraux sur la construction), cette dernière contient un formulaire détaillé;
- L'expert remplit le formulaire puis le valide;
- Le système vérifie les données saisies, puis les enregistre dans la BC et affiche le formulaire du sol et constructions adjacentes, un message d'erreur sera affiché dans le cas contraire ;
- L'expert remplit le formulaire puis le valide;
- les mêmes étapes se répètent jusqu'à la fin du processus d'évaluation.

Remarque : Dans ce diagramme, quelques abréviations ont été utilisées tels que :

RGC : Renseignements généraux sur la construction ; Sol-C.Adja : Sol et Constructions Adjacentes ; Fond-Infra : Fondations et Infrastructures ; Struct-Resist : Structure Résistante ; Struct-Second : Structure Secondaire.

IV.12. Le diagramme de classe

Les diagrammes de classes sont utilisés dans le but de faire abstraction du comportement du système c.-à-d. décrire les types des objets qui composent l'outil et les différents types de relations statiques qui existent entre eux (Conallen 2000). Dans le cas d'EDPS, le diagramme d'UML a été adopté, ainsi on a abouti à l'illustration présentée par

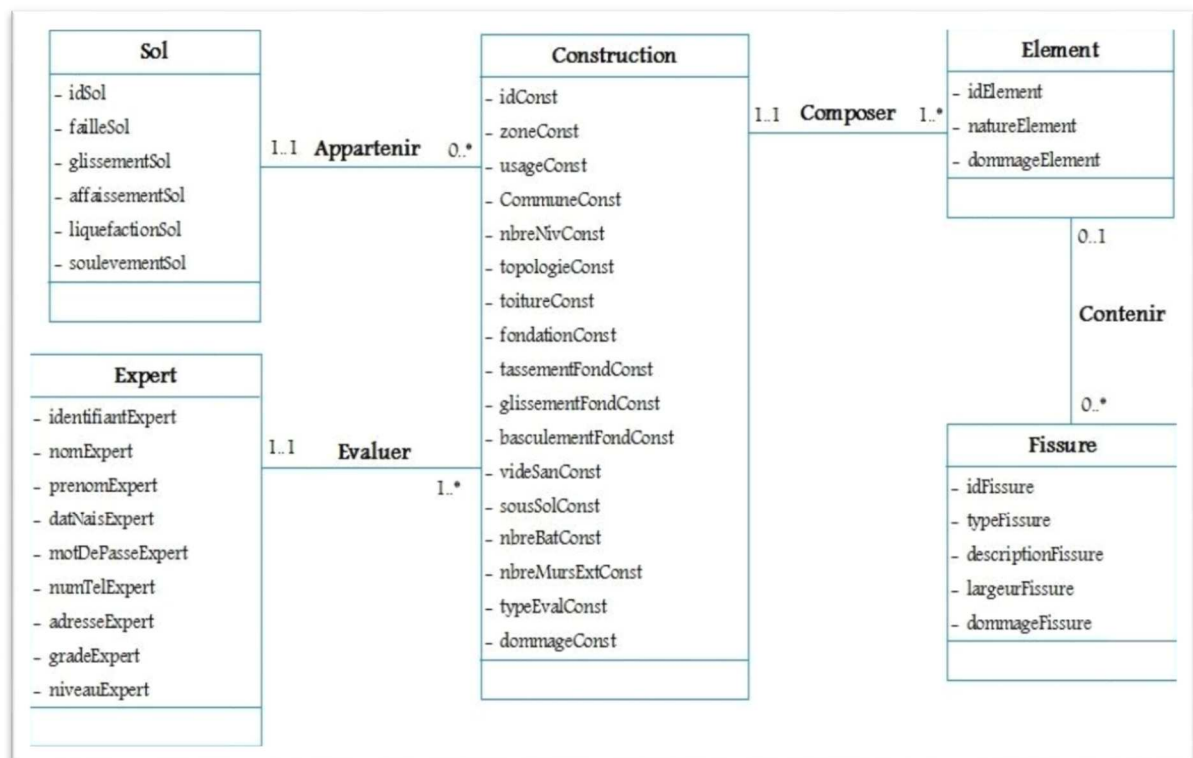


Figure IV.11. Diagramme de classe du système EDPS.

IV.12.1. Le modèle relationnel

En appliquant les règles de transformation du diagramme de classe vers un modèle relationnel, nous avons abouti au schéma relationnel suivant :

Construction : (idConst, zoneConst, communeConst, nbreNivConst, topologieConst, toitureConst, fondationConst, tassementFondConst, glissementFondConst, basculementFonConst, videSanConst, sousSolConst, nbreMursExtConst, typeEvalConst, dommageConst, identifiantExpert*) ;

Élément : (idElement, natureElement, dommageElement, idConst*) ;

Expert : (identifiantExpert, prenomExpert, dateNaisExpert, numTelExpert, motDePasseExpert, adresseExpert, gradeExpert, niveauExpert) ;

Fissure : (idFissure, typeFissure, descriptionFissure, largeurFissure, dommageFissure, idElement*) ;

Sol : (idSol, failleSol, affaissementSol, glissementSol, liquefactionSol, soulevementSol, idConst*) ;

Remarque : les clés primaires sont soulignées et les clés étrangères sont marquées par une étoile.

IV.13. Conclusions

L'IA propose des alternatives intéressantes aux problèmes d'aide à la décision, et c'est là que s'impose l'approche SE. Dans ce chapitre, après avoir présenté les deux catégories de composants pouvant intervenir dans la construction d'un SE, la fonction de chaque composant est définie d'une manière très détaillée. Puis, les différents systèmes experts développés dans le domaine du Génie Civil ont été passé en revue. Aussi, les différents formalismes utilisés pour représenter les connaissances exploitées par *EDPS* ont été présentés.

Chapitre V

Réalisation du système *EDPS*

Sommaire du chapitre V

V.1. Introduction.....	- 95 -
Partie A : Présentation des composants et outils intervenants dans la réalisation de l' <i>EDPS</i>	- 96 -
V.2. Développement du système <i>EDPS</i>	- 96 -
V.2.1. Modélisation d' <i>EDPS</i>	- 96 -
V. 3. Présentation des différents modules de l' <i>EDPS</i>	- 96 -
V.3.1. La base de connaissances (BC)	- 97 -
a- La base de faits (BF)	- 97 -
b- La base de règles (BR).....	- 97 -
V.3.2. Le moteur d'inférence (MI).....	- 97 -
V.3.3. Les modules d'interfaces.....	- 97 -
a- L'interface Propriétaire.....	- 97 -
b- L'interface Expert	- 97 -
c- L'interface Administrateur	- 98 -
V.3.4. Un module d'aide	- 98 -
V.3.5. Un module d'explication.....	- 98 -
V.3.6. Un module d'acquisition de la connaissance.....	- 98 -
V.4. Présentation des outils utilisés dans le développement de l' <i>EDPS</i>	- 98 -
V.4.1. Environnement de développement	- 98 -
V.4.2. Présentation des outils utilisés.....	- 99 -
a- Présentation de SWI-Prolog.....	- 99 -
b- présentation de Java	- 100 -
c- Présentation de l'IDE NetBeans.....	- 100 -
d- Présentation de MySQL	- 100 -
e- Présentation de Java Prolog Link «JPL».....	- 101 -
f- Présentation de Java Data-Base-Connectivity «JDBC»	- 101 -
V.4.3. Récapitulatif des outils utilisés.....	- 102 -
Partie B : Développement de la Base de Connaissance	- 102 -
V.5. Conception de la BC	- 103 -
V.5.1. Conception des faits BF	- 103 -
V.5.1.1. Cas d'évaluation par Propriétaire	- 103 -
V.5.1.1.1. Connaissances relatives au bloc d'éléments secondaires	- 104 -
a- Inspection de l'élément mur	- 104 -
b-Inspection de l'élément balcon	- 109 -
c-Inspection de l'élément extérieur (cas des cheminées)	- 111 -
d-Inspection de l'élément Escalier	- 113 -
V.5.1.1.2. Connaissances relatives au bloc d'éléments structuraux	- 115 -
a- Inspection de l'élément planchers.....	- 115 -

<i>b- Inspection de l'élément Toiture.....</i>	- 117 -
<i>c-Inspection de l'élément poteau.....</i>	- 118 -
<i>d-Inspection de l'élément poutre.....</i>	- 120 -
<i>e-Inspection de l'élément contreventement</i>	- 122 -
V.5.1.1.3 Connaissances relatives au bloc sol.....	- 123 -
V.5.1.1.4. Connaissances relatives au bloc environnement de la construction	- 124 -
V.5.1.2. Cas d'évaluation par l'expert.....	- 125 -
V.5.2. Conception de la base de règles BR	- 126 -
V.5.2.1. Les règles d'inférences	- 126 -
<i>a-Estimation du niveau de dommage</i>	- 126 -
<i>b-Estimation du nombre de sans-abris NSA(I).....</i>	- 126 -
<i>c-Introduction de ces modèles dans la BC</i>	- 126 -
Partie C : Présentation des interfaces du système <i>EDPS</i>	- 129 -
V.6. Présentation de quelques interfaces de l' <i>EDPS</i>	- 129 -
V.6.1. Interface d'accueil.....	- 129 -
V.6.2. Interface d'authentification pour l'expert.....	- 129 -
V.6.3. Interface Expert	- 130 -
V.6.4. Interface Recherche.....	- 130 -
V.7. Conclusions	- 131 -

implémenter les différentes fonctionnalités du système. Ce chapitre est constitué de trois parties. Dans la première, les différents composants (principaux et secondaires) de l'*EDPS*, les différents outils utilisés lors du développement de ces composants ainsi que ceux utilisés pour la création des différentes connexions entre ces mêmes composants sont présentés. La seconde partie, est consacrée à la présentation des connaissances implémentées dans l'outil *EDPS*. Enfin, nous présentons quelques interfaces dans la troisième partie.

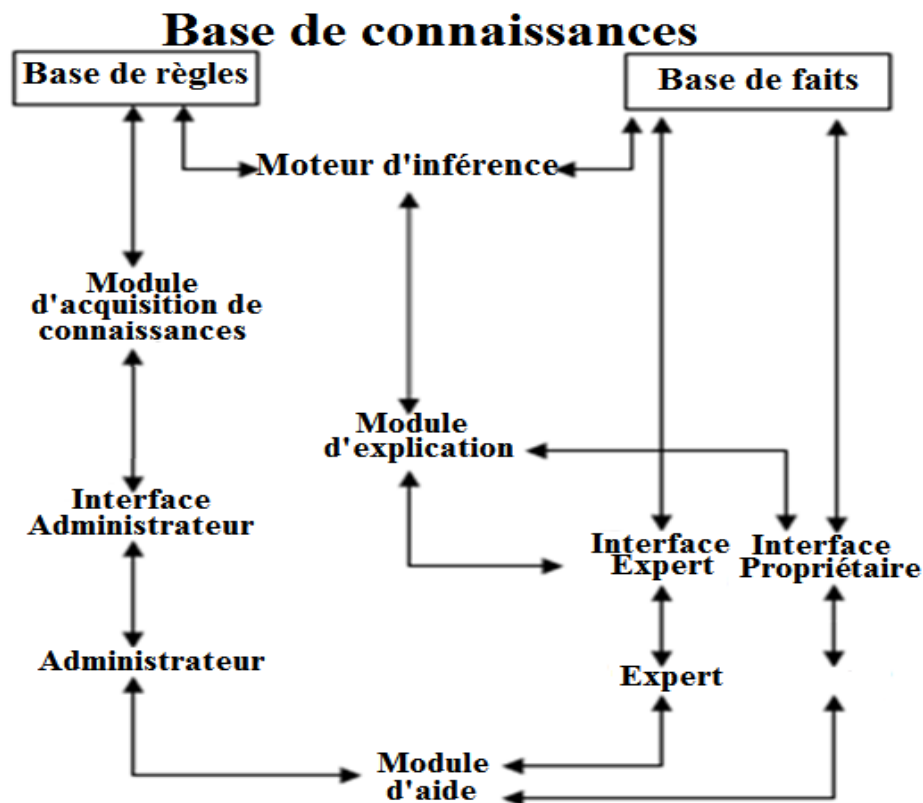
Partie A : Présentation des composants et outils intervenants dans la réalisation de l'*EDPS*.

V.2. Développement du système *EDPS*

La réalisation d'un SE requiert le suivi de deux étapes : la première relative à la modélisation du SE, et la seconde correspond à la formalisation du savoir (acquisition des connaissances).

V.2.1. Modélisation d'*EDPS*

Cette phase représente la partie conceptualisation «systématisation» du problème. Elle est relative au développement de l'architecture du système *EDPS*. A la figure V.1, nous présentons l'architecture de notre *EDPS* qui s'articule autour d'une base de règles, d'une base de faits, un moteur d'inférence, un module d'aide, un module d'acquisition de connaissances et des interfaces graphiques.

Figure V.1. Architecture de l'*EDPS*.

V. 3. Présentation des différents modules de l'*EDPS*

Dans le but de garder le critère, facilité d'utilisation de l'*EDPS*, en plus des deux modules de bases, plusieurs modules sont ajoutés à sa structure, tels que:

V.3.1. La base de connaissances (BC)

La connaissance, une fois modélisée, est stockée dans une base de faits et une base de règles en utilisant la logique des prédicats (logique d'ordre 1) et la logique des règles de productions.

a- La base de faits (BF)

Suivant les connaissances collectées (voir la partie 2 de ce chapitre), nous avons choisis la logique des prédicats pour monter la *BF*.

Un fait est toujours représenté sous la forme suivante :

Fait = prédicat (argument).

- Prédicat : c'est une fonction booléenne, qui prend un ou plusieurs arguments.
- Argument : peut-être un prédicat, une valeur numérique ou un caractère alphabétique.

b- La base de règles (BR)

Elle rassemble les connaissances et le savoir-faire de l'expert du domaine. Ces connaissances sont représentées par des règles de productions dont la syntaxe est la suivantes:

SI <conditions> ALORS <conclusion>

- Condition : est un fait ou plusieurs faits ; c'est la partie «déclencheuse» de la règle.
- Conclusion : est un fait ; c'est la partie déclenchée (déduite) de la règle.

V.3.2. Le moteur d'inférence (MI)

Le *MI* utilise la base de règles pour répondre à la demande des utilisateurs du système *EDPS*. Il représente le noyau du programme, qui s'occupe de parcourir la base de connaissance à la recherche de résultats pour les différentes requêtes.

V.3.3. Les modules d'interfaces

Ils sont créés dans le but d'assurer la communication bidirectionnelle «système-utilisateur » et de convertir les règles internes (que l'utilisateur peut ne pas comprendre) au format compréhensible par l'utilisateur. Comme le système *EDPS* est manipulé par trois types d'utilisateurs, nous le dotons de trois interfaces différentes:

- a- *L'interface Propriétaire* : Le propriétaire accède à *EDPS* par cette interface, elle lui permet de mieux décrire le problème, de faire le diagnostic et de récupérer le résultat du diagnostic avec les explications demandées.
- b- *L'interface Expert* : Cette interface permet à l'expert (toute personne chargée par les autorités compétentes à réaliser l'expertise des constructions) de communiquer avec le système afin d'introduire les faits (les niveaux de dommage des éléments) et obtenir le résultat du diagnostic (niveau de dommage global de la structure).
- c- *L'interface Administrateur* : elle est reliée au module d'acquisition de connaissances. Cette interface « protégée » permet, uniquement aux programmeurs qui sont agréés par le CGS, de manipuler la base de données et la base de règles.

V.3.4. Un module d'aide

Créé dans l'objectif de mettre à la disposition des utilisateurs (propriétaire et expert) un guide d'utilisation d'*EDPS*. Ce module leurs permet une utilisation facile de l'outil, en y fournissant des explications sur sa structure et son fonctionnement.

V.3.5. Un module d'explication

La fonction de ce module est d'expliquer le raisonnement aux utilisateurs d'*EDPS* après l'élaboration d'un diagnostic et ce à la demande de l'utilisateur. Il affiche des règles déclenchées au cours du diagnostic avec les commentaires associés.

V.3.6. Un module d'acquisition de la connaissance

Un SE doit être évolutif et extensible, le module d'acquisition de connaissances permet l'ajout, la modification et la suppression d'une ou de plusieurs règles.

Chaque règle qui est ajoutée à la *BR* subit un contrôle de cohérence qui consiste en deux tests :

Test de redondance : vérifier l'inexistence dans la *BR* d'une règle équivalente afin d'éviter la redondance.

Test de contradiction : vérifier l'inexistence dans la *BR* d'une règle ayant les mêmes prémisses mais une conclusion différente.

V.4. Présentation des outils utilisés dans le développement de l'*EDPS*

La mise en œuvre du système *EDPS* exige l'emploi d'un certain nombre d'outils informatiques. Le choix de ces derniers est établi selon des critères de simplicité et de compatibilité c.-à-d. la concordance entre les outils. Suivant leurs rôles, ces outils sont utilisés soit :

- Dans le développement des composants du SE ; *MI*, *BC* et interfaces.
- Dans la réalisation des différentes liaisons entre ces composants (*MI-Interface* et *MI-BC*).

V.4. 1. Environnement de développement

Comme pour tous les *SE*, le raisonnement du *MI* se fait sur les faits et sur les règles de la *BC*. Pour bien représenter la *BC*, nous avons opté pour le formalisme logique à travers les prédicats Prolog. Le raisonnement est alors assuré par le *MI Prolog*. La base de travail est alimentée interactivement via des interfaces Java. L'interfaçage entre Java et Prolog est assuré par une bibliothèque spécifique : la *JPL* (Java Prolog Link).

Afin de sauvegarder les informations et les renseignements concernant les différentes constructions expertisées et les dommages subis, nous avons mis en place une base de données relationnelle implémentée dans le système de gestion des bases de données relationnelles (*SGBDR*) MySQL. Ce *SGBDR* est inclut dans la plateforme *WAMP*.

La connectivité entre le serveur MySQL et Java (la manipulation de la *BDD* à partir de *NetBeans*) est assurée par l'*APIJava* qui s'appelle *JDBC* (Java DataBase Connectivity).

L'environnement de développement de notre outil est constitué de :

- Prolog (*SWI-Prolog 7.4.1*) pour la programmation de la base de connaissances,
- Java sous *NetBeans IDE 8.2* pour la programmation des interfaces graphiques ;
- *JPL* (Java) pour l'interfaçage *Java/Prolog* ;
- *MySQL* pour l'implémentation de la *BDD* ;

- *JDBC* (Java) pour la liaison *Java/MySQL*.

V. 4.2. Présentation des outils utilisés

a- Présentation de SWI-Prolog

Le SWI-Prolog est une implémentation complète et portable du langage de programmation Prolog développé par Jan Wielemaker à l'université d'Amsterdam. *SWI-Prolog* vise à être une implémentation robuste et évolutive prenant en charge un large éventail d'applications. En particulier, elle est livrée avec une large gamme de bibliothèques d'interface fournissant d'une part, des interfaces à d'autres langages, et d'autre part, des bases de données, des graphiques et réseaux (Wielemaker 2006). Elle fournit un support étendu pour la gestion des documents de type *HTML/SGML/XML* et *RDF*. Le système est particulièrement adapté aux applications serveur grâce à un support robuste pour les bibliothèques multithreading et serveurs *HTTP* (Covington et al. 1995).

Cette version est caractérisée par :

- Une syntaxe simple, un débogueur complet et une documentation complète et gratuite ;
- Divers possibilités de communication avec d'autres langages comme le C, le C++ et Java.

b- présentation de Java

Java est un langage de programmation *orienté objet*. Sa syntaxe est proche de celle du langage C++ mais avec des fonctionnalités qui rendent le langage plus simple : absence de pointeurs et gestion automatique de la mémoire centrale (Donahue 2002). Trois plateformes d'exécution Java sont définies pour des cibles distinctes, selon les besoins des applications à développer :

- Java Standard Edition (*J2SE/ Java SE*) : environnement d'exécution et ensemble complet d'API pour des applications de type desktop ;
- Java Enterprise Edition (*J2EE /Java EE*) : environnement d'exécution reposant intégralement sur Java SE pour le développement d'applications d'entreprises;
- Java Micro Edition (*J2ME / Java ME*) : environnement d'exécution et API pour le développement d'applications sur appareils mobiles et embarqués, dont les capacités ne permettent pas la mise en œuvre de Java SE.

c- Présentation de l'IDE NetBeans

C'est un environnement de développement intégré (*IDE*) moderne offrant un éditeur avec des codes couleurs et un ensemble de signes, des modèles de projets multi-langage et de

différents types (application indépendante, distribuée, plugin, mobiles, ... etc.), l'éditeur graphique d'interfaces et de pages web pour supporter le programmeur dans son travail. Il permet d'accéder rapidement à la documentation détaillée, de naviguer dans les sources et de faire des recherches d'usage des classes, méthodes et propriétés (Phat-Ly et al. 2016).

L'*EDI NetBeans* fournit des outils pour construire tous les composants Java EE, ce qui inclut les Enterprise JavaBeans (*EJB*), les pages Web et les Services Web.

Il intègre le serveur d'application Glass fish, ce qui permet de développer facilement des *EJB* et de les déployer. Il intègre aussi la norme Web-Service *JAX-WS*. Il est aisé de lier un WS avec un *EJB* pour faire son implémentation (Phat-Ly et al. 2016).

C'est pour ces raisons que nous l'avons adopté dans le développement des interfaces de l'*EDPS*.

d- Présentation de MySQL

Le *MySQL* est un système de gestion de bases de données relationnelles (*SGBDR*). Il est distribué sous une double licence *GPL*. Il fait partie des logiciels de gestion de base de données les plus utilisés dans le monde, autant par le grand public (applications web principalement) que par les professionnels (Soutou 2002 ; Rizzo&Machanic 2005).

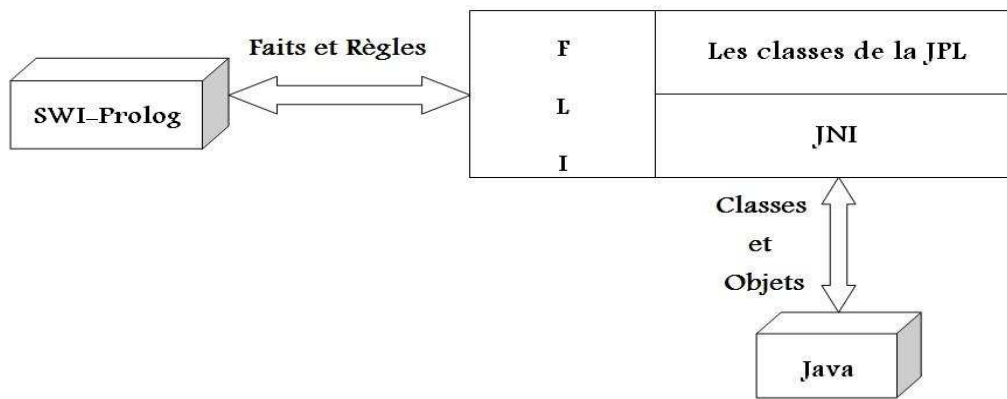
Pour réaliser notre projet, nous avons utilisé la version gratuite de *MySQL*, cette dernière est incluse dans la plateforme *WAMP*.

Le *WAMP Server* est une plate-forme de développement Web sous Windows pour des applications Web dynamiques. Il utilise un langage de scripts *PHP* et une base de données *MySQL*. Il possède également *PHP-MyAdmin* pour gérer plus facilement les bases de données (Dewson2009).

e- Présentation de Java Prolog Link «JPL»

Pour rendre *SWI-Prolog* complet du point de vue des interfaces graphiques et portatif, les créateurs de *SWI-Prolog* ont mis en place une bibliothèque appelée *JPL* qui permet à java de communiquer avec prolog et vice-versa (Bratlok 1986).

La *JPL* est un ensemble de classes Java et de fonctions C fournissant une interface entre Java et prolog. Ainsi, comme le montre la figure V.2, la *JPL* emploie la *JNI* (Java Native Interface) pour se relier au moteur de prolog à travers son interface *FLI* des langages externes (Foreign Language Interface).

Figure V.2. Schéma de la *JPL* (Rizzo & Machanic 2005).

Elle est conçue en deux couches différentes, une interface de bas niveau en prolog *FLI* et une interface de haut niveau en Java (cette dernière interface est destinée aux programmeurs Java qui ne sont pas concernés par les détails de la programmation logique et le fonctionnement de la *FLI*) (Rizzo & Machanic 2005).

f- Présentation de Java Data-Base-Connectivity «JDBC»

Afin de permettre à un programmeur Java de développer des applications orientées base de données, la plate-forme Java intègre une API appelée *JDBC* à partir de la version 1.1 de JDK. C'est l'API standard pour permettre un accès à une base de données (Delannoy 2001). C'est une spécification qui définit des interfaces (package *Java.sql*) pour se connecter et interagir avec la base de données (exécution de requêtes, procédures stockées, Etc.). L'implémentation de ces spécifications est fournie par des tiers, et en particulier les fournisseurs de base de données, sous la forme de pilote (Driver).

V. 4.3. Récapitulatif des outils utilisés

Les dispositifs utilisés pour la mise en œuvre du système *EDPS* sont résumés par la figure V.3.

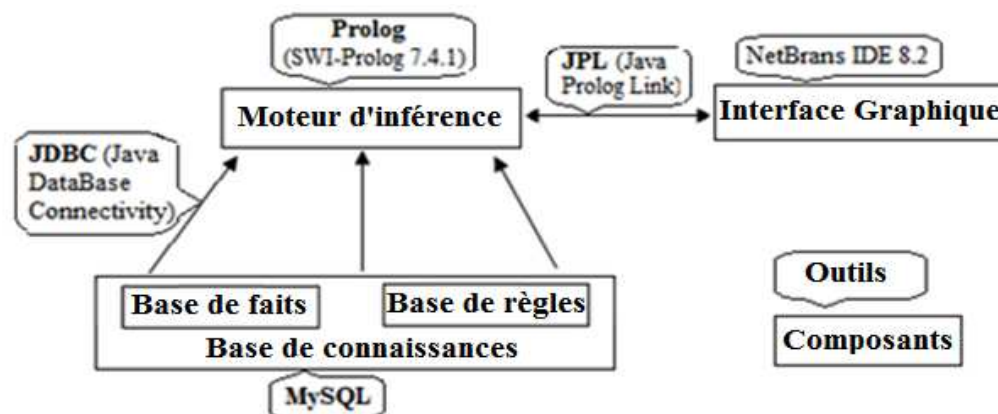


Figure V.3. Résumé des divers dispositifs utilisés.

Partie B : Développement de la Base de Connaissance

L'acquisition de connaissances consiste à collecter des informations à partir de sources diverses (Merriitt 2001). Concernant le système *EDPS*, l'extraction de la connaissance est effectuée selon les démarches suivantes :

Une capitalisation du retour d'expérience par interviews auprès d'experts qualifiés des organismes du CTC, en particulier ceux des antennes de Tizi-Ouzou et de Boumerdes, du CGS, ainsi qu'à travers des réunions de travail avec les membres de l'équipe de recherche «pathologie, vulnérabilité et réhabilitation des structures de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou».

Le traitement d'une banque de données constituée de 8398 fiches d'expertises issues de l'enquête post-sismique du séisme de Boumerdes en 2003. Parmi ces fiches, 7890 d'entre-elles ont été remises par le CGS dans le cadre de ce travail de thèse et 508 autres remises par le CTC de Boumerdes et utilisées par la même équipe dans le cadre d'un autre travail de thèse (Hamizi et al. 2011).

Un traitement exhaustif des conclusions contenues dans divers ouvrages publiés, en particulier :

Les travaux de recherche récents (Bechtoula & Ousalem 2004; Belazougui 2008; Carreño et al. 2010; D'Ayala & Paganoni 2011; Maeda et al. 2014),

Les rapports d'expertises (Bertero & Haresh 1983; AFPS 2003; Davidovici2003; EERI 2003; Anagnostopoulos et al. 2008; Davidovici 2010; AFPS 2012),

Les ouvrages du domaine (OFPP 2004; Baggio et al. 2007; Cancino et al. 2009; CUREE 2010; Bosi et al. 2011; OFPP 2018).

Toute la connaissance ainsi ramassée a été implémentée pour une évaluation Expert et une évaluation Propriétaire.

V.5. Conception de la BC

Les connaissances présentées ci-dessus sont représentées par l'utilisation de faits et de règles comme modalités.

V.5.1. Conception des faits BF

Les faits, représentent l'ensemble des dommages pouvant apparaître après un événement sismique (fissures, éclatement du béton ... etc.). La définition de ce fait diffère d'un utilisateur à un autre. Ainsi, dans ce qui suit, nous distinguons ceux qui sont relatifs au cas d'évaluation par le propriétaire et ceux qui correspondent au cas d'évaluation par l'expert.

V.5.1.1. Cas d'évaluation par Propriétaire

Dans le cas d'une évaluation par le propriétaire, un fait est représenté par une question i.e. une question directe reflétant le (s) dommage (s) visible (s) ou invisible (s) par déduction. Ainsi, il peut décrire un état, une situation ou un signe de dommage, tel qu'il est illustré sur la figure V.4.

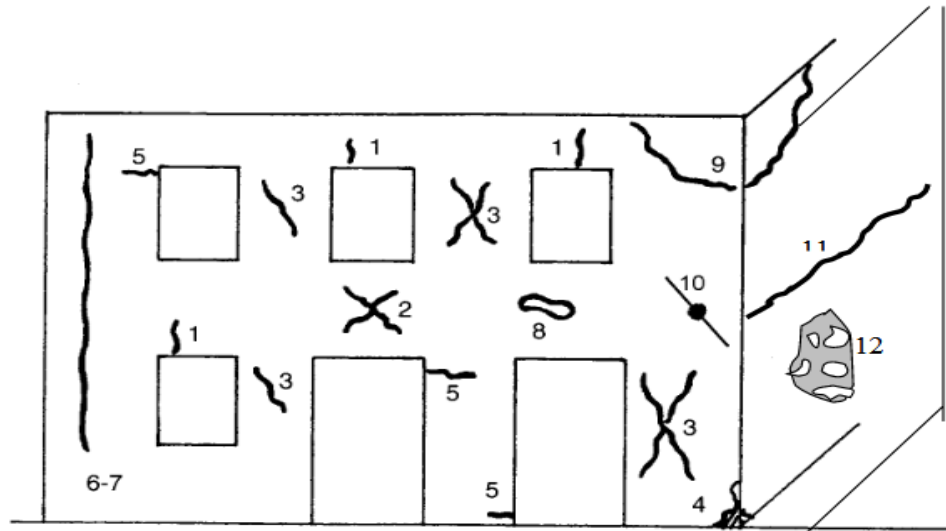


Figure V.4. Exemple de structures endommagées (Baggio et al. 2007).

Où :

- 1 : fissures presque verticales sur les linteaux d'ouverture;
- 2 : fissures diagonales dans les poutres de tympans (parapets de fenêtres, linteaux);
- 3 : fissures diagonales dans les éléments verticaux (piliers de maçonnerie);
- 4 : écrasement local de la maçonnerie avec ou sans expulsion de matériau;
- 5 : fissures presque horizontales au sommet et / ou au pied des piliers de maçonnerie;
- 6 : fissures presque verticales aux intersections des murs;
- 7 : identique à 6 mais avec des fissures traversantes;
- 8 : expulsion de matériau au niveau des supports de poutre due au martèlement;
- 9 : formation d'un coin déplacé à l'intersection de deux murs orthogonaux;
- 10 : défaillance des tirants ou du glissement de la liaison;
- 11 : fissures horizontales au niveau du sol ou au niveau des combles;
- 12 : séparation d'un des murs d'un double mur.

N.B. Tel que présenté, selon la configuration constatée (la nature, la position, la diffusion et l'importance des désordres), chaque élément sera doté d'un degré de dommages selon l'échelle EMS 98.

V.5.1.1.1. Connaissances relatives au bloc d'éléments secondaires

a- Inspection de l'élément mur

Un certain nombre de dommages pouvant apparaître sur l'élément mur sont présentés sous formes d'images et traduits en diagrammes.



a- dommage de catégorie D1



b- dommage de catégorie D2



c- dommage de catégorie D3



d- dommage de catégorie D4



e- dommage de catégorie D5

Figure V.5. description des catégories de dommages pour l'élément mur intérieur



Figure V.6. Description des catégories de dommages pour l'élément mur extérieur.

Les schémas donnés sur la figure V.7 illustrent la manière dont est menée l'inspection des dommages présentés par les figures V.5 et V.6.

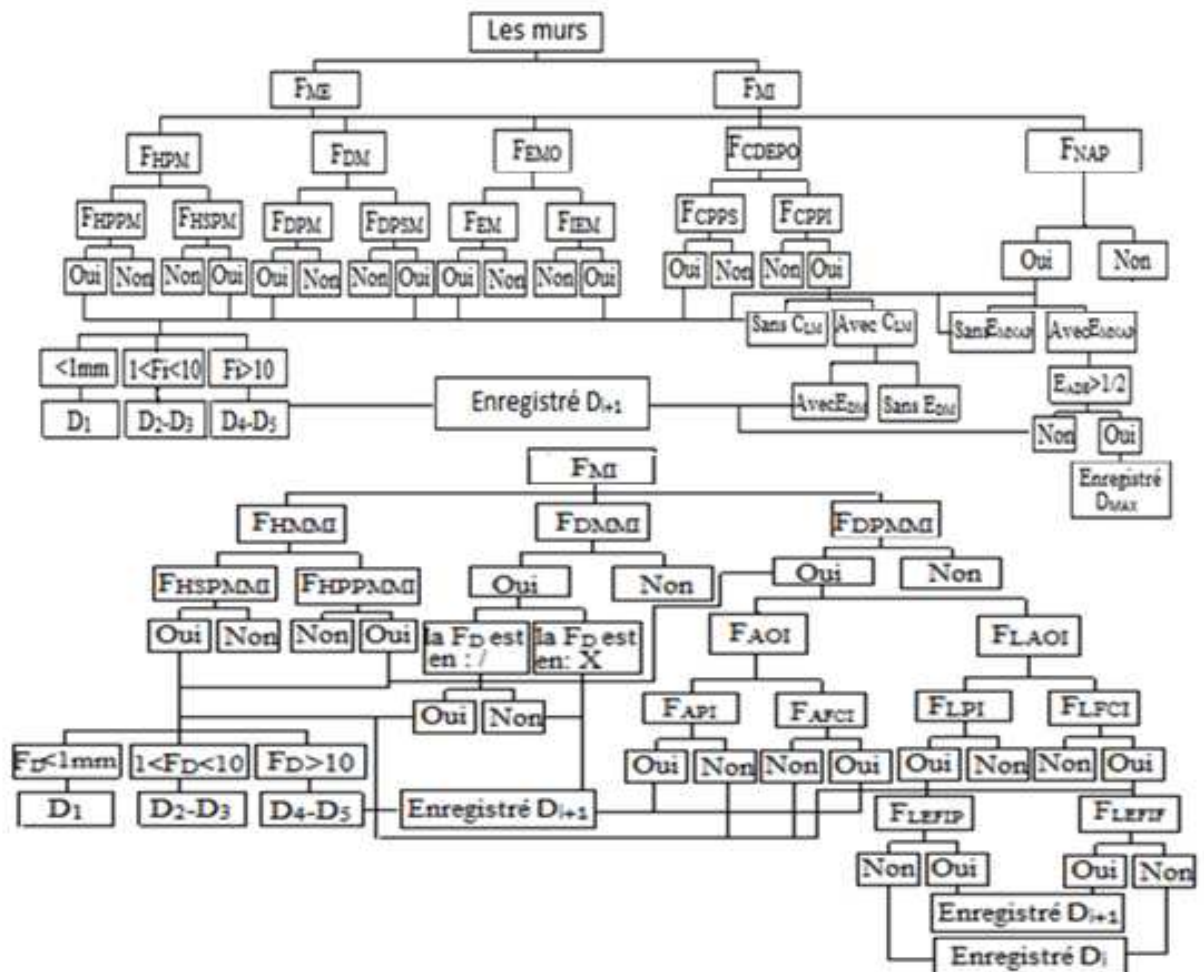


Figure V.8. Schématisation des étapes d'identification des dommages sur l'élément mur.

Avec :

D_{EM} : Dommage de l'Élément Mur.

F_{MI} : Fissure sus le Mur Intérieur.

F_{ME} : Fissure sur le Mur Extérieur.

F_{HPM} : Fissure Horizontale sur le Pilier en Maçonnerie.

F_{HPPM} : Fissure Horizontale au Pied du Pilier en Maçonnerie.

F_{HSPM} : Fissure Horizontale au Sommet du Pilier en Maçonnerie.

F_{DM} : Fissure Diagonale sur la Maçonnerie.

F_{DPM} : Fissure Diagonale sur le Pilier en Maçonnerie.

F_{DPSM} : Fissure Diagonale sur la Poutres en Maçonnerie.

F_{EM}: Fissure Entre Murs.

F_{EMO}: Fissure Entre Murs Orthogonaux.

FIEM: Fissure à l'Intersection des Murs Externes.

F_{CDEOP} : Formation de Coins Déplacés Entre deux Parois.

FCPPS : Fissure de Coin sur la Partie Supérieure du Pilier.

FCPP1 : Fissure de Coin sur la Partie Inférieure du Pilier.

F_{NAP}: Fissure au Niveau des Appuis.

C_{LM}: Concassage Local de la Maçonnerie.

F_{HMMI}: Fissure Horizontale sur Mur de Maçonnerie Interne.

F_{HPMMI}: Fissure Horizontale sur le Pilier en Maçonnerie du Mur Intérieur.

F_{HPPMMI}: Fissure Horizontale au Pied du Pilier en Maçonnerie du Mur Intérieur.

F_{HSPMMI}: Fissure Horizontale au Sommet du Pilier en Maçonnerie du Mur Intérieur.

F_{DMMI}: Fissure en Diagonale sur Mur en Maçonnerie Interne.

F_{DPMMI}: Fissure en Diagonale sur Pilier en Maçonnerie du Murs Interne.

F_{AOI}: Fissure à l'Angle des Ouvertures Internes.

F_{LAOI}: Fissure sur Linteaux des Ouvertures Internes.

F_{LPI}: Fissure sur Linteaux des Portes Internes.

F_{LFCI}: Fissure du côté Interne sur Linteaux des Fenêtres.

F_{AFCI}: Fissure sur Angles des Fenêtres du Côté Intérieur.

b- Inspection de l'élément balcon

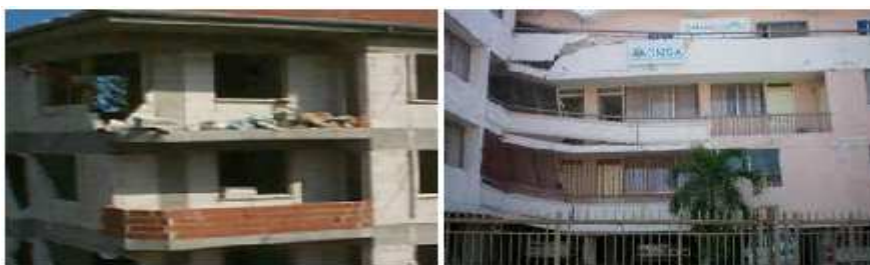
a- dommage de catégorie D1



b- dommage de catégorie D2



c- dommage de catégorie D3



d- dommage de catégorie D4



e- dommage de catégorie D5

Figure V.9. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément Balcon.

Les connaissances relatives à l'inspection des dommages sur l'élément Balcon (figure V.9) sont introduite dans la *BC* sous forme de Faits et de Règles telle que présenté sur la figure V.10.

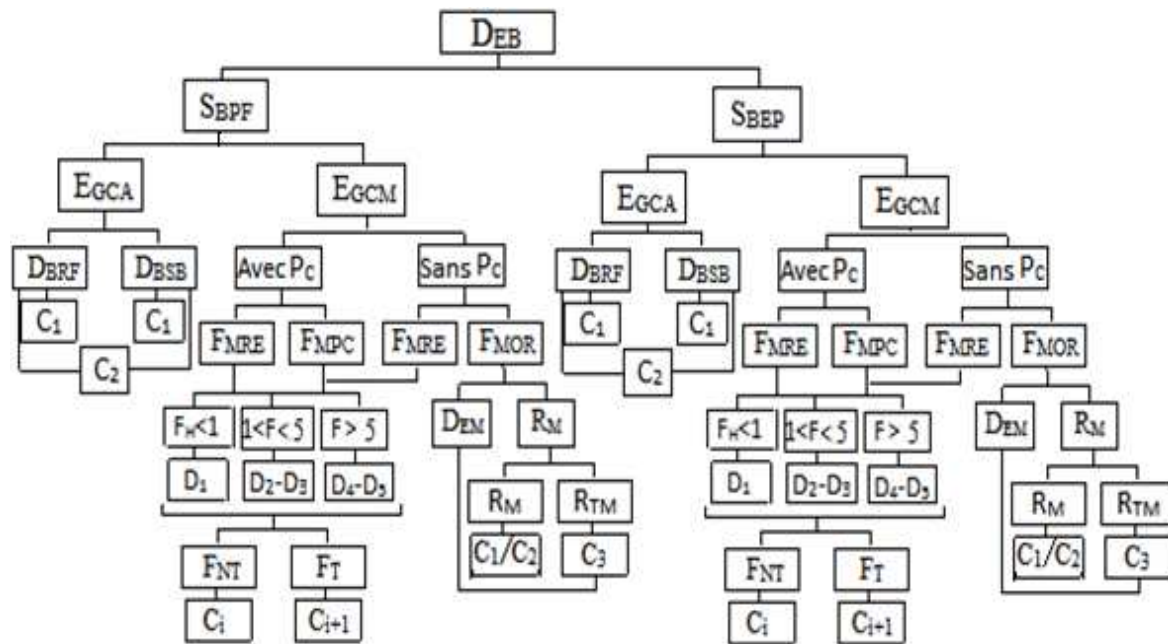


Figure V.10. Recapitulatif de la méthode d'identification des dommages sur les balcons.

Avec :

- DEB : Dommages sur Éléments Balcons
- SBEP : Sol du Balcon est un Élément Plancher.
- SBPF : Sol du Balcon en Préfabriqué.
- EGCM : Élément Gard Corps en Maçonnerie.
- EGCA : Élément Gard Corps en Acier.
- FMPC : Fissure entre Mur et Poteau de chaînage.
- FMRE : Fissure entre Mur et Remplissage Extérieur.
- DEM : Déconnection entre les Éléments de la Maçonnerie.
- FMOR : Fissure entre Murs Orthogonaux.
- RTM : Renversement Total de la Maçonnerie du Balcon.
- RM : Renversement Partiel de la Maçonnerie du Balcon.
- DBSB : Déconnection entre Barres et Sol du Balcon.
- DBRE : Déconnection entre Barres et Remplissage Extérieur.

c- Inspection de l'élément extérieur (cas des cheminées)



Figure V.11. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément cheminé.

Les dommages pouvant apparaitres sur l'élèment cheminée sont évalués suivant le raisonnement présenté sur la figure V.12.

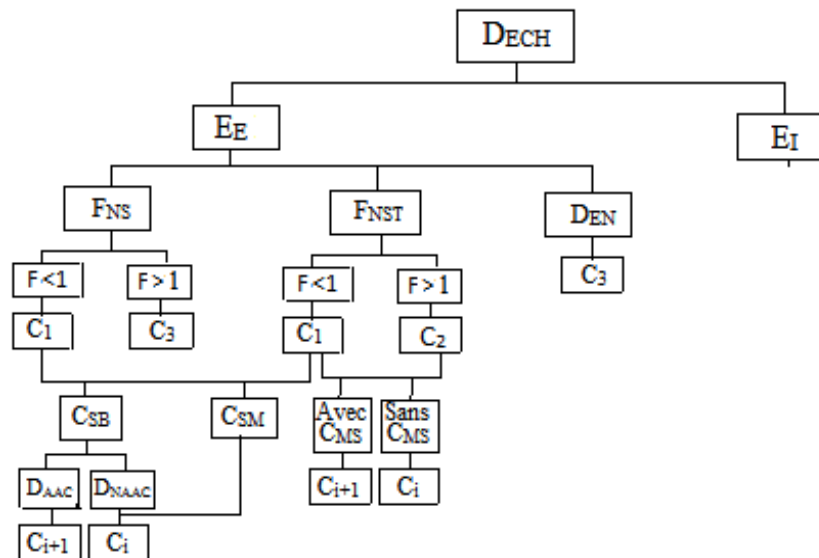


Figure V.12 Recapitulatif sur l'identification des dommages au niveau des cheminées.

Avec :

$DECH$: Dommages liés à l'Élément Cheminée.

EE : Évaluation de l'Extérieur.

EI : Évaluation de l'Intérieur

FNS : Fissure au Niveau de la Souche.

CSB : Chapeau de la Souche en Béton.

CSM : Chapeau de la Souche en Métal.

$DAAC$: Dommages Apparent au niveau des Appuis de Chapeau.

$DNAAC$: Dommages non Apparent au niveau des Appuis de Chapeau.

CMS : Concassage de la Maçonnerie de la Souche.

d- Inspection de l'élément Escalier

a- Dommages de niveau D1



b- Dommages de niveau D2



c- Dommages de niveau D3



d- Dommages de niveau D4



e- Dommages de niveau D5

Figure V.13. Dommages inspectés sur l'élément escalier.

Un récapitulatif des différents dommages pouvant se manifester sur l'élément escalier est présenté sur la figure V.14.

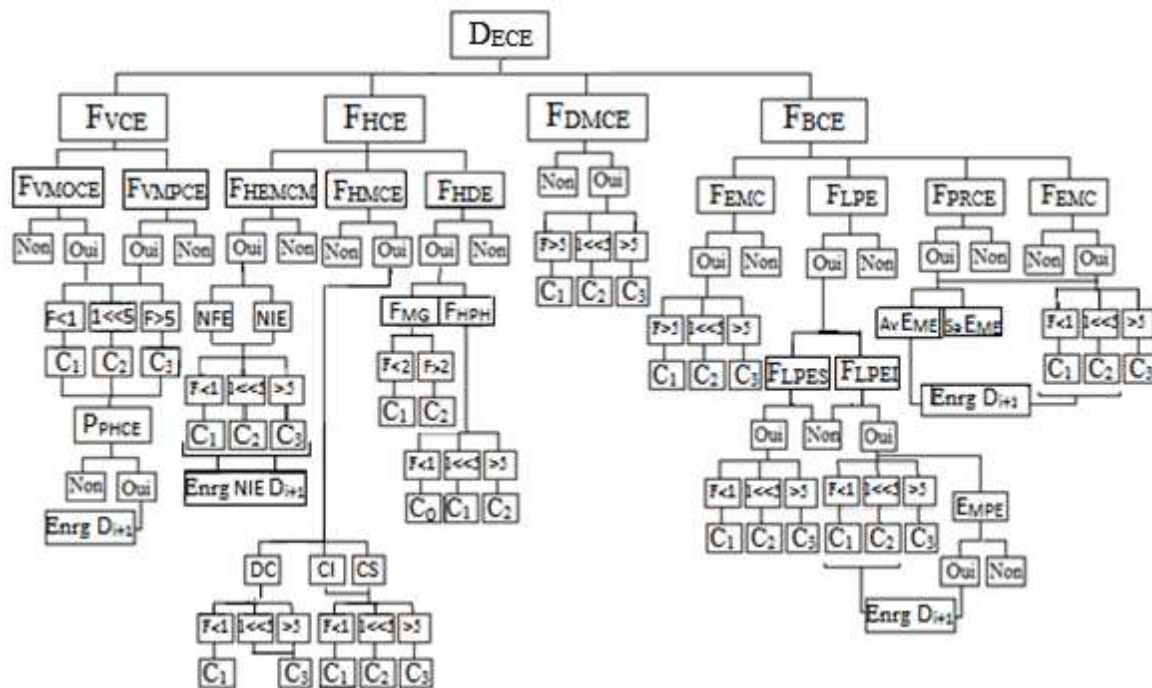


Figure V.14. Récapitulatif de la démarche d'identification des dommages au niveau de l'élément escalier.

Avec :

- DECE : Dommage dans la Cage d'Escalier.
- FVCE : Fissure Verticale dans la Cage d'Escalier.
- FVMOCE : Fissure Verticale entre Murs Orthogonaux de la Cage d'Escalier.
- FVMPCE : Fissure Verticale entre Mur et Poteau de la Cage d'Escalier.
- FHCE : Fissures Horizontales dans la Cage d'Escalier.
- FHMCE : Fissure Horizontale sur Mur de la Cage d'Escalier.
- FHEMCE : Fissure Horizontale aux Extrémités du Mur de la Cage d'Escalier.
- NFE : Nombre d'Escalier endommagé Faible.
- NIE : Nombre d'Escalier endommagé Important.
- C_I : Dommage apparent dans la partie Inférieur du mur.
- C_S : Dommage apparent dans la partie Supérieur du mur.
- D_C : Dommage apparent dans les deux Cotés du mur.
- FHDE : Fissure Horizontale hors des zones d'Extrémité.
- FMG : Fissure en Gradin dans le Mur.
- FHPH : Fissure Horizontale.
- FDMCE : Fissure en Diagonale dans le Mur de la Cage d'Escalier.
- FBCE : Fissure du Béton de la Cage d'Escalier.
- FLPE : Fissure sur le Long de la Paillasse de l'Escalier.
- FLPES : Fissure sur le Long de la Paillasse de l'Escalier (partie Supérieure).
- FLPEI : Fissure sur le Long de la Paillasse de l'Escalier (partie Inférieure).
- FPRCE : Fissure sur Palier de l'Escalier
- FEMC : Fissure Entre Marche et contremarche
- EME : Évacuation du Matériau.

V.5.1.1.2. Connaissances relatives au bloc d'éléments structuraux

a- Inspection de l'élément planchers



Figure V.15. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément plancher.

Les dommages présentés sur la figure V.15 sont introduits dans la base de connaissances de l'EDPS selon l'organigramme donné sur la figure V.16.

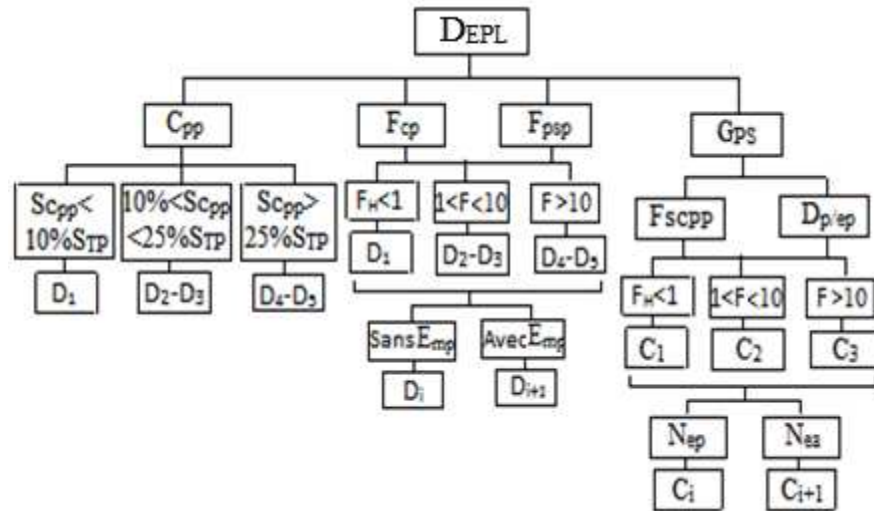


Figure V.16 Recapitulatif de l'identification des dommages au niveau des planchers

Avec :

- DEPL : Dommage de l'élément Plancher
- Cpp : Chute de Portion de Plâtre.
- SCPP : Surface Dégradée par la Chute du P-P.
- STP : Surface Totale du Plafond.
- Fcp : Fissure (en 45°) au Coin du Plafond.
- EMP : Évaluation du Matériau au niveau du Plafond.
- Fpsp : Fissure Parallèle aux Solives dans le Plafonds.
- Gps : Glissement des poutres Secondaires.
- Fscpp : Fissure du Système de Connexion Poutre-Élément Porteurs.
- Dp/EP : Décalage de la Poutre par rapport aux Éléments Porteurs.
- NEA : nombre d'Éléments Affectés.

b- Inspection de l'élément Toiture



Figure V.17. description des différentes catégories de dommages pour l'élément Toiture inclinée.

c- Inspection de l'élément poteau



Figure V.18. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément poteau.

Le schéma présenté sur la figure V.19, illustre un exemple de la démarche retenue pour l'inspection des dommages sur l'élément poteau.

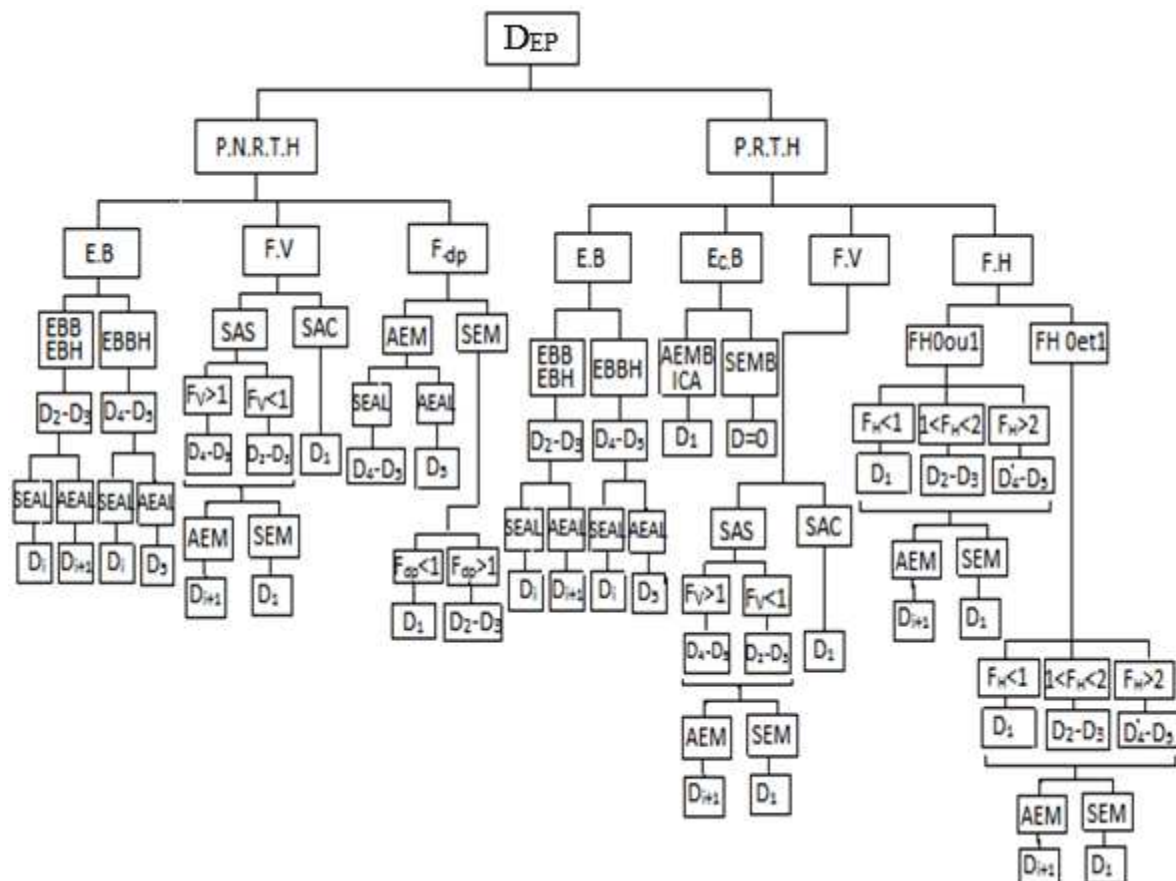


Figure V.19. Recapitulatif sur l'identification des dommages au niveau des poteaux.

Avec :

DEP : Élément Poteau.

PRTH : Poteau avec Remplissage sur Tout sa Hauteur.

PNRTH : Poteau non Remplie sur Tout sa Hauteur.

EB : Éclatement du Béton.

ECB : Écaillage du Béton.

FH : Fissure Horizontale.

FV : Fissure Verticale.

Fdp : Fissure en Diagonale sur Poteau

ECB : Écaillage du Béton.

EBB : Éclatement du Béton à la Base du Poteau.

EBH : Éclatement du Béton à la Hauteur du Poteau.

EBBHP : Éclatement du Béton à la Base et à la Hauteur du Poteau.

SAS : Suite Aux Séismes.

SAC : Suite à la Corrosion des Aciers.

SEAL : Sans Éclatement des Aciers Longitudinaux.

AEAL : Avec Éclatement des Aciers Longitudinaux.

AEM : Avec Évacuation de Matériau.

SEM : Sans Évacuation de Matériau.

d- Inspection de l'élément poutre

Figure V.20. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément poutre.

Dans le schéma présenté sur la figure V.21, certaines étapes retenues pour l'identification des dommages donnés par la figure V.20, sont récapitulées.

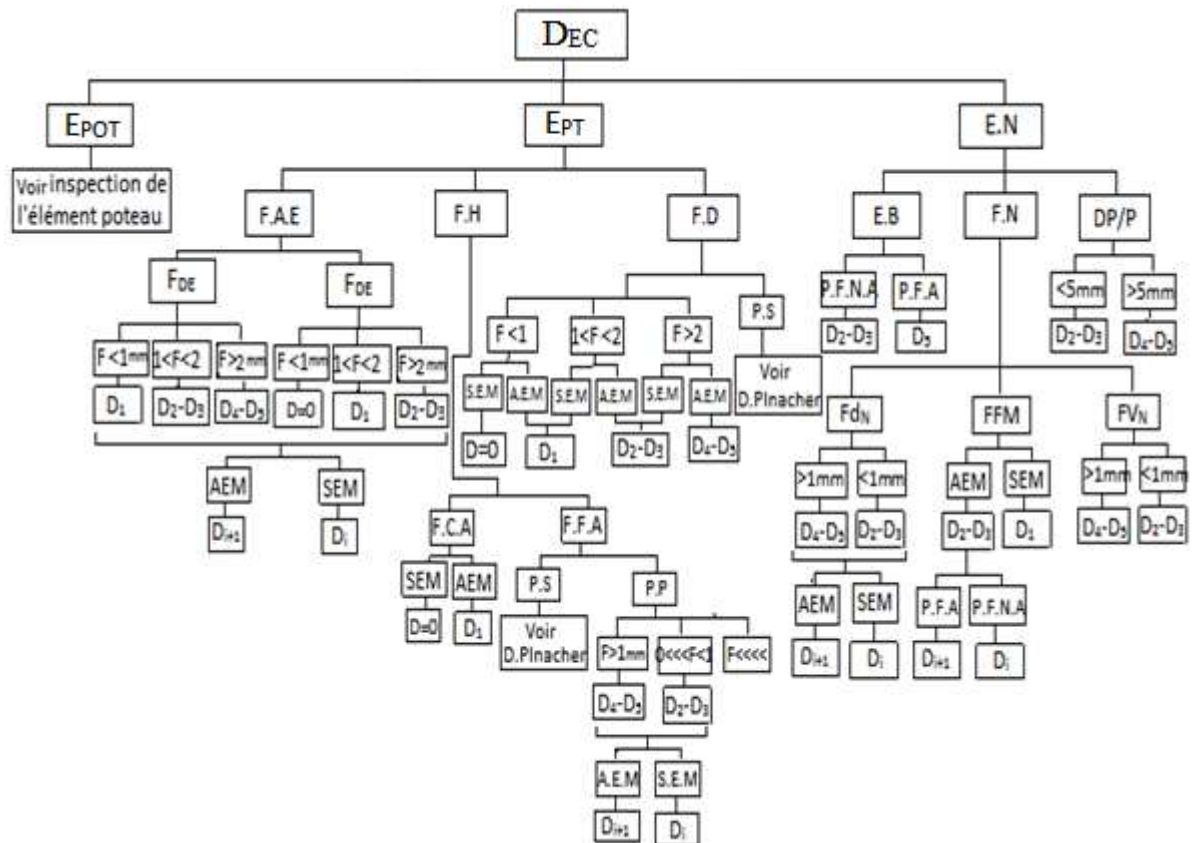


Figure V.21. Recapitulatif sur l'identification des dommages au niveau des poutres.

Avec :

DEC : Domage Élément Contreventement

EPOT : Élément Poteau

EPT : Élément Poutre

EN : Élément Nœud

FH : Fissure Horizontale « dans le sens longitudinal de la poutre ».

FAE : Fissure Aux Extrémités de la poutre.

Fd : Fissure en diagonale.

DP/P : Déplacement du Poteau par rapport à la Poutre.

EB : Éclatement du Béton.

FN : Fissuration du Nœud.

PFA : Position du Ferrailage Affectée.

PFNA : Position du ferrailage Non Affectée.

FdN : Fissure en diagonale dans le Nœud.

FVN : Fissure Verticale dans le Nœud.

FCA : Fissure due à la corrosion des Aciers.

FFA : Fissure due aux Flambement des Aciers.

PP : Poutre Principale.

PS : Poutre Secondaire.

AEM: Avec Évacuation des Matériaux.

SEM: Avec Évacuation des Matériaux.

e- Inspection de l'élément contreventement



Figure V.22. Description des différentes catégories de dommages pour l'élément voile.

V.5.1.1.3 Connaissances relatives au bloc sol



Figure V.23. les différents désordres du sol de la construction.

L'évaluation des différents dommages pouvant se manifester sur le sol de la construction est effectuée selon le raisonnement donné sur la figure V.24.

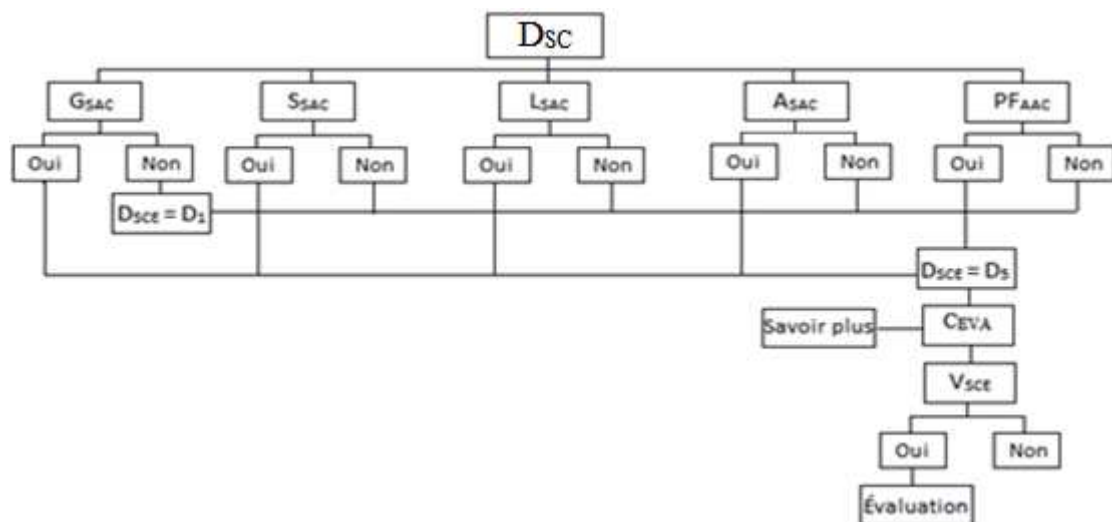


Figure V.24. Identification des dommages au niveau du sol.

Avec :

- D_{SC}: Dommage du Sol de la Construction.
- G_{SAC}: Glissement du Sol Autour de la Construction.
- S_{SAC}: Soulèvement du Sol Autour de la Construction.
- L_{SAC}: Léquifaction du Sol Autour de la Construction.

$ASAC$: Affaissement du Sol Autour de la Construction.

PF_{AAC} : Présence de Faille sur le Sol Autour de la Construction.

$CEVA$: Construction à Évacuer

V_{SCE} : Savoir l'état de la construction

V.5.1.1.4. Connaissances relatives au bloc environnement de la construction



Figure V.25. description du danger dû à l'instabilité des constructions adjacentes.

Un récapitulatif des étapes d'inspection de l'environnement de la construction est illustré sur la figure V.26

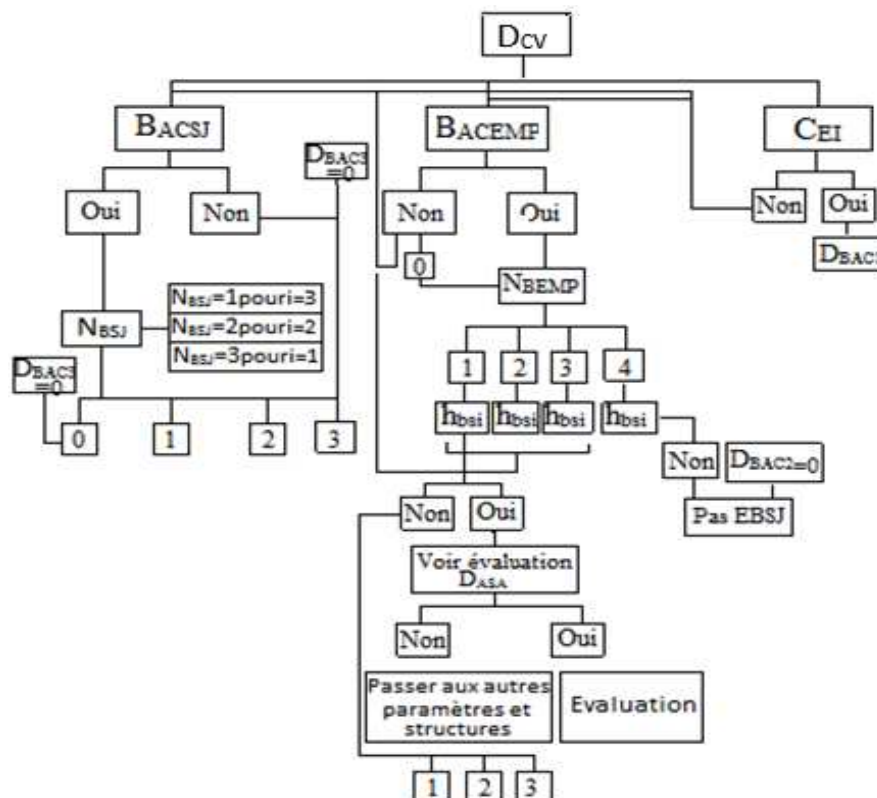


Figure V.26. Identification des dangers issus des constructions avoisinantes.

Avec : D_{CV} : Dommages des Constructions Voisines

RRCE : Renseignements Relatifs à la Construction Étudiée.

BAC : Bâtiments Autour de la construction Étudiée.

CEI : Construction est Isolée.

B_{ACSJ} : Bâtiment Autour de la Construction Séparée avec Joint.

B_{ACEMP} : Bâtiment Autour de la construction est Séparée des autres constructions.

N_{bEMP} : Nombre de bâtiments Éloignés.

hbs : hauteur du bâtiment supérieur à la distance qu'il le sépare du bâtiment étudié.

Lorsque le dommage apparent n'est pas représenté d'une manière directe par la question posée (exemple ; des désordres de nature différentes se manifestant sur le même élément), ce dommage sera créé par combinaison avec d'autres questions.

En second lieu, à partir de ces différents résultats, les constructions peuvent être classées en trois catégories de dommages différentes, tableau V.1 :

Tableau V.1. Les différentes classes de dommages, cas d'évaluation par Propriétaire (Baggio et al. 2007).

Couleur	Vert	Orange	Rouge
Symbole	$C_1 = [D_1]$	$C_2 = [D_2-D_3]$	$C_3 = [D_4-D_5]$
signification	Construction à utiliser sans aucun danger	Construction à utiliser avec un degré de prudence.	Construction inutilisable

V.5.1.2. Cas d'évaluation par l'expert

Dans le cas où l'évaluation est menée par l'expert, un fait est représenté par une question. Cette question mène à une appréciation du niveau de dommage (à l'échelle d'un composant) à laquelle aboutit l'expert. De même, chaque fait représente un état de dommage estimé suivant la procédure présentée dans le formulaire donné sur la figure II.13.

Par d'éduction, *EDPS* peut proposer quelques solutions à l'ingénieur par apport à sa sécurité ou à un état de dommage (d'un composant, d'un ensemble de composant ou de la structure) en s'appuyant uniquement sur les données introduites initialement.

À partir de ces résultats, les constructions sont ensuite classées en cinq catégories de dommages différentes, similaire à celles de l'échelle EMS-98 (classé d'une catégorie «dommage léger D_1 » à «effondrement partiel ou global D_5 »).

Tableau V.2. Les différents degrés de dommage, cas d'évaluation par expert (Grünthal & Levret 2001).

Couleur	V ₁	V ₂	O ₃	O ₄	R ₅
Symbole	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
Signification	Dommage très léger	Dommage léger	Dommage important	Dommage Très important	Effondrement «partiel ou total»

V.5.2. Conception de la base de règles BR

Deux types de règles sont utilisés dans la BR de l'*EDPS* : des règles d'inférences et des règles heuristiques. Elles sont données respectivement sous forme de modèles mathématiques et de conditions (Si «condition» Alors «conclusion»).

V.5.2.1. Les règles d'inférences

Parmi les règles d'inférences introduites dans la *BC*, on retrouve des modèles mathématiques, utilisés pour l'estimation du niveau de dommage (D_{ER} , D_{ENR} et D_G) et du nombre de sans-abri $NSA(I)$:

a- Estimation du niveau de dommage

D_{ER} englobe tous les composants structuraux à savoir : les éléments porteur D_{EP} , les éléments de contreventement D_{EC} , les éléments plancher-toiture-terrasse D_{EPTT} et l'élément toiture incliné D_{ETI} :

$$D_{ER} = 0.467 * D_{EP} + 0.40435 * D_{EC} + 0.22085 * D_{EPTT} + 0.21385 * D_{ETI} - 0.0514 * D_{EP} * D_{EC} - 0.03165 * D_{EP} * D_{EPTT} - 0.0504 * D_{EC} * D_{EPTT} - 0.09465 * D_{EP} * D_{ETI} - 0.01465 * D_{EC} * D_{ETI} - 0.0459 * D_{EPTT} * D_{ETI} + 0.06785 * D_{EP} * D_{EC} * D_{EPTT} - 0.0094 * D_{EP} * D_{EC} * D_{ETI} - 0.0774 * D_{EP} * D_{EPTT} * D_{ETI} + 0.05485 * D_{EC} * D_{EPTT} * D_{ETI}$$

D_{ENR} qui regroupe tous les éléments non-structuraux à savoir : l'élément escalier D_{EES} ; les éléments intérieurs D_{EI} ; les éléments extérieurs D_{EE} et les autres éléments extérieurs D_{EAE} :

$$D_{ENR} = 0.4418125 * D_{EES} + 0.4155625 * D_{ERE} + 0.2868125 * D_{EI} + 0.2081875 * D_{EEX} + 0.0119375 * D_{EES} * D_{ERE} + 0.0069375 * D_{ERE} * D_{EI} - 0.0244375 * D_{ERE} * D_{EEX} - 0.0793125 * D_{EES} * D_{EI} - 0.0481875 * D_{EES} * D_{EEX} + 0.0168125 * D_{EI} * D_{EEX} - 0.0144375 * D_{EES} * D_{ERE} * D_{EI} - 0.0055625 * D_{EES} * D_{ERE} * D_{EEX} + 0.0131875 * D_{EES} * D_{EI} * D_{EEX} + 0.0144375 * D_{ERE} * D_{EI} * D_{EEX}.$$

Le degré de dommage D_G : représente l'état de toute la structure en fonction de D_{ER} et de D_{ENR} .

$$D_G = 1 + 0.79 * D_{ER} + 0.57 * D_{ENR} - 0.107 * D_{ER} * D_{ENR}.$$

b- Estimation du nombre de sans-abris $NSA(I)$

Calculée en fonction du degré de dommage D_G donné ci-dessus (Auclair et al. 2015).

$$NSA(I) = a(I) * RD_2 + RD_3, D_4, D_5 - (R_{vict})$$

Avec : NSA , nombre de sans-abris, RD_i le nombre de constructions en fonction des degrés de dommages, et $a(I)$ un coefficient de minoration.

c- Introduction de ces modèles dans la BC

L'introduction de ces modèles dans la *BC* est établie sous forme de règles de production, tel que donné par le programme suivant :

```

der(DER):- dep(DEP), dec(DEC), deptt(DEPTT), deti(DETI),
A is a * DEP, B is b * DEC,
    C is c * DEPTT, D is d * DETI,
E is e * DEP * DEC,
    F is f * DEP * DEPTT,
    G is g * DEC * DEPTT,
H is h * DEP * DETI,
I is i * DEC * DETI,
J is j * DEPTT * DETI,
K is k * DEP * DEC * DEPTT,
L is l * DEP * DEC * DETI,
M is m * DEP * DEPTT * DETI,
N is n * DEC * DEPTT * DETI,
DER is A + B + C + D + E + F + G + H + I + J + K + L + M + N.
des (DES):dees(DEES), dere(DERE), dei(DEI), deex(DEEX),
A is o * DEES, B is p * DERE,
C is q * DEI,
D is r * DEEX,
E is s * DEES * DERE,
F is t * DERE * DEI,
    G is u * DERE * DEEX,
    H is v * DEES * DEI,
    I is w * DEES * DEEX,
    J is x * DEI * DEEX,
    K is y * DEES * DERE * DEI,
    L is z * DEES * DERE * DEEX,
    M is a1 * DEES * DEI * DEEX,
    N is a2 * DERE * DEI * DEEX,
    DES is A + B + C + D + E + F + G + H + I + J + K + L + M + N.
dg (der(DER), denr (DENR), DG):- der(DER), denr (DENR),
A is a3 * DER,
B is a4 * DENR,
C is a5 * DER * DENR,
DG is A + B + C + 1.

nah (NAH) (a(i) (a(I)), rd2(RD2), rd3, d4, d5 (RD3,D4, D5), rvict(Rvict)
A is b1 * a(I)
B is b2 * RD2
C is b3 * RD3, D4, D5
D is b4 * Rvict
NAH is A+B+C-D.

```

V.5.2.2. Les règles heuristiques

Pour combler le manque de règles données ci-dessus, d'autres règles dites heuristiques sont utilisées et introduites sous formes de conditions dans divers objectifs. Parmi ces règles, on retrouve celles utilisées pour :

- La classification des dommages:

Si «structure en maçonnerie» + Si «mur en maçonnerie» + Si «pilier en maçonnerie» + Si «présence de dommage» Alors «classé le dommage en D_{EP} ».

- L'estimation du dommage d'un composant:

Si «famille de désordre = fissure» + si «fissure verticale» + si «fissure extrémité du mur» + si «fissure d'un seul côté » + si «sur toute la hauteur du mur» + si «fissure de largeur > 1 (mm)» + si «fissure traversante» alors premier dommage du composant mur = D_3 .

- La prise de décision suivant l'environnement de la structure :

Si «sol de structure endommagé» + si «présence de structures dangereuses» alors structure à évacuer (D_5).

Partie C : Présentation des interfaces du système *EDPS*

V.6. Présentation de quelques interfaces de l'*EDPS*

Dans ce qui suit, les principales interfaces illustrant le fonctionnement du logiciel *EDPS* seront présentées.

V.6.1. Interface d'accueil

Après le lancement du logiciel *EDPS*, la fenêtre exposée au niveau de la figure V.27., apparaîtra, avec une passerelle vers les autres interfaces.



Figure V.27. Interface d'accueil du logiciel

V.6.2. Interface d'authentification pour l'expert

Lorsqu'on clique sur le bouton «Expert», tel que présenté par la figure V.28., une interface d'authentification apparaîtra, demandant à l'expert de saisir son identifiant ainsi que son mot de passe.



Figure V.28. Interface d'authentification de l'expert.

V.6.3. Interface Expert

Une fois la phase d'authentification achevée, l'accès est autorisé à l'interface Expert (voir figure V.29).



Figure V.29. L'interface Expert.

V.6.4. Interface Recherche

À travers l'interface illustrée par la figure V.30., l'utilisateur du logiciel (administrateur, expert ou propriétaire) peut faire une recherche sur tous les constructions déjà évaluées selon plusieurs critères.

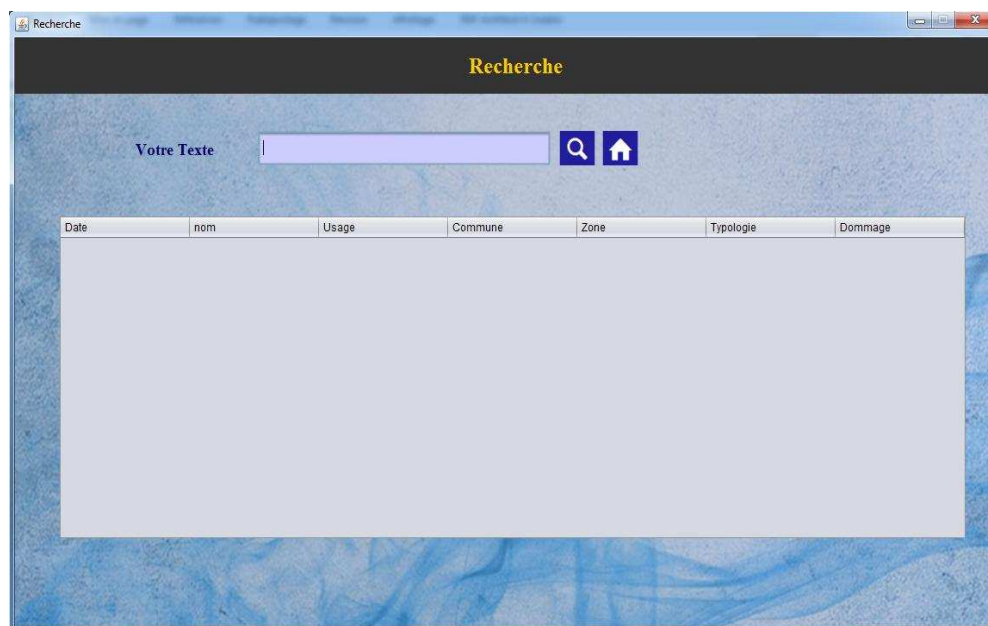


Figure V.30. Interface de recherche.

V.7. Conclusions

Dans ce chapitre, les différents modules constituant l'outil *EDPS* ainsi que l'importance de chacun d'entre eux sont présentés.

Après avoir vu d'une façon détaillée le champ d'application (la base de connaissances incluant les faits et les règles relatives aux cas d'inspection par le propriétaire et par l'expert), et après avoir retenu une idée sur les stratégies de fonctionnement du système proposé c.-à-d. l'identification des différents composants constituant l'outil *EDPS*, le chapitre qui succède est réservé à la conception du Système *EDPS*.

Étant donné que l'implémentation est la partie qui suit celle de la conception, elle nous a permis de réaliser le système *EDPS*. En effets, dans la partie suivante, une mise en application de l'outil est effectuée.

Chapitre VI

Mise en application de l'EDPS

Sommaire du chapitre VI

VI.1. Introduction.....	- 132 -
VI.2. Application de l'outil	- 132 -
VI.3. Cas d'évaluation par propriétaire	- 132 -
VI.3.1. Gestion de l'environnement de la construction.....	- 133 -
VI.3.1.1. Évaluation du sol autour de la construction	- 133 -
VI.3.1.2. Évaluation des structures adjacentes	- 134 -
VI.3.2. Évaluation du danger provenant de la construction elle-même.....	- 136 -
VI.3.2.1. Évaluation des éléments externes de la construction	- 136 -
a- Évaluation des murs extérieurs	- 136 -
b- Évaluation des façades.....	- 138 -
c- Évaluation de la Toiture inclinée	- 138 -
VI.3.2.2. Évaluation des éléments internes de la construction	- 139 -
a- Évaluation de la cage d'escalier	- 139 -
b- Éléments porteurs	- 141 -
c- Éléments de contreventements	- 142 -
d- Évaluation des murs intérieurs.....	- 143 -
e- Évaluation des planchers.....	- 145 -
f- Évaluation de la Cheminée	- 146 -
g- Évaluation de l'élément «Balcon»	- 148 -
VI.3.3. Estimation du niveau de dommage global	- 149 -
VI.4. Cas d'évaluation par Expert.....	- 150 -
VI.4.1. Phase d'Authentification.....	- 150 -
VI.4.2. Phase d'avant inspection.....	- 151 -
VI.4.3. Phase d'inspection de l'environnement de la construction	- 152 -
VI.4.4. Phase d'évaluation de l'infrastructure.....	- 153 -
VI.4.5. Phase d'évaluation des éléments structuraux et non-structuraux	- 153 -
VI.4.6. Phase d'évaluation de la catégorie de dommage globale	- 155 -
VI.5. Conclusions.....	- 156 -

VI.1. Introduction

L'aboutissement de ce travail de recherche consiste en un programme interactif exposé ci-après. En effet, ce produit final incluant une interface graphique permet aux utilisateurs de se familiariser rapidement avec les fonctionnalités du logiciel. Au-delà de son objectif premier, assister les non-experts dans la prise de décision, l'outil développé sert à éduquer l'utilisateur sur le raisonnement d'experts.

Dans ce chapitre, une évaluation est effectuée via l'outil *EDPS*, sur des structures endommagées par un séisme. La mise en application de cet outil est exposée suivant les deux catégories d'utilisation : Une évaluation avec l'interface propriétaire, puis, une évaluation avec l'interface Expert, menée en parallèle avec une fiche d'expertise.

VI.2. Application de l'outil

La figure VI.1., montre la page d'accueil obtenue, à l'ouverture de l'outil *EDPS*.



Figure VI.1. Page d'accueil du système *EDPS*.

Ainsi, au début du processus, l'utilisateur peut se présenter ou s'identifier comme (1) Propriétaire, (2) Administrateur ou (3) Expert.

VI.3. Cas d'évaluation par propriétaire

Lorsque l'utilisateur choisit «Évaluer ma maison», option (1) sur la (Figure VI.1), le système le renvoi automatiquement vers l'interface propriétaire (utilisateur amateur) comme le montre la figure VI.2. La 1ère icône porte sur des informations d'ordres générales tels que : le lieu d'implantation (tenir compte de l'aléa sismiques régionales, lié à

la carte de zonage sismique du RPA99/2003), la typologie de la structure, la nature de la toiture, la nature de l'infrastructure et la présence de vide sanitaire ou de sous-sol ...etc.

The screenshot shows a web application window titled "Renseignements généraux sur la construction". The form is organized into two columns. The left column contains: "Nom" (AKKOUCHE Karim), "Wilaya" (Tizi Ouzou), "Commune" (Tizi Ouzou), "Usage de la construction" (Logement comm...), and "Nombre de niveau" (4). The right column contains: "Typologie de la construction" (Poteaux poutres), "Type de la toiture" (Charpente), "Type de fondation" (Semelle filante), "Vide sanitaire" (non), and "Sous Sol" (non). At the bottom left is an "Accueil" button with a home icon, and at the bottom right is a "Valider" button with a checkmark icon. A small "2A" label is visible next to the "Commune" field.

Figure VI.2. Introduction d'informations d'ordre générales.

Après validation de ces données, l'EDPS effectue un 1^{er} tri sur la BC où il classera uniquement les connaissances propres au cas étudié.

VI.3.1. Gestion de l'environnement de la construction

L'investigation dans EDPS se fait selon deux évaluations; externe et interne. Après validation des renseignements généraux, l'activation de l'icône "suivant" permet à l'exécuteur d'introduire, toutes les informations relatives à l'état du sol autour de la construction (ensemble des effets pouvant être induits par le séisme), ainsi que l'état des structures adjacentes, tel que représenté par les figures VI.3 et VI.4.

VI.3.1.1. Évaluation du sol autour de la construction

Parmi toutes les menaces extérieures à la construction, nombreuses sont celles liées aux-sites alentour (Figure VI.3). En effet, les conséquences résultantes de leurs désordres peuvent être néfastes à la stabilité de la structure, et sont donc répertoriés dans EDPS, comme montré sur la figure VI.4.



Figure VI.3. Images reflétant l'état du sol après séisme (AFPS 2003).

Sol autour de la construction	
Présence de faille aux alentours de la construction	NON
Affaissement du sol autour de la construction	NON
Glissement du sol autour de la construction	OUI
Liquéfaction du sol autour de la construction	NON
Soulevement du sol autour de la construction	OUI

Retour Accueil Valider

Figure VI.4. Identification des menaces provenant de l'état du sol de la construction.

En s'appuyant sur les dommages apparus et en s'inspirant du module d'aide de l'outil EDPS, le propriétaire peut ainsi répondre efficacement aux questions données par l'interface.

VI.3.1.2. Évaluation des structures adjacentes

L'instabilité des structures adjacentes est un fait très fréquent après séisme. Ainsi, lorsque les structures sont proches les unes des autres (exemple : cas des villes Algériennes), celles dont la stabilité est affectée peuvent représenter une source de danger accrue sur les autres (voir figure VI.5).



Figure VI.5. Structure menacée par l'instabilité des autres (AFPS 2003).

Pour permettre au propriétaire de prendre en compte le danger issu des structures adjacentes, *EDPS* met à sa disposition l'interface présentée sur la figure VI.6.

Figure VI.6. Identification dans *EDPS* des menaces extérieures dues à l'endommagement des structures adjacentes.

Si le propriétaire confirme que la structure inspectée est isolée, la phase d'identification des dangers extérieurs dus aux structures adjacentes s'annule. Dans le cas contraire, le propriétaire doit introduire d'autres informations qui vont permettre à l'*EDPS* de prendre en considération ce danger. Parmi les informations demandées, on retrouve ; le nombre de bâtiments voisins menaçants, leurs hauteurs, l'origine de leurs instabilités ...etc.

Après l'évaluation externe, dans le cas où le propriétaire affirme l'existence d'une menace provenant de l'extérieur, l'*EDPS* signale la présence d'un danger (figure VI.7) et qu'au meilleur des cas la structure est classée à évacuer jusqu'au passage d'experts.



Figure VI.7. Réponse d'EDPS après inspection de l'environnement.

Par contre, dans le cas où aucune menace externe n'est présente, avec décision de poursuivre l'évaluation, le propriétaire est guidé vers l'interface permettant de mener des «évaluations internes».

VI.3.2. Évaluation du danger provenant de la construction elle-même

Dans ce cas, le propriétaire inspecte les différents composants : résistants et non-résistants de la construction. Ces derniers sont contrôlés en deux phases dépendantes de l'extérieur et de l'intérieur de la construction, présentées dans ce qui suit :

VI.3.2.1. Évaluation des éléments externes de la construction

L'évaluation des composants externes d'une construction se fait sur plusieurs parties. En effet, cette inspection se fait de manière logique, en commençant par « la toiture », premier élément à évaluer, jusqu'aux « ouvertures » et « portes d'entrées », en passant par des composants, tels que : « éléments porteur », « murs extérieurs » et « balcons ».

a- Évaluation des murs extérieurs

Lors de cette phase d'inspection, le propriétaire identifie tous les dommages sismiques occasionnés à l'élément dit : « mur extérieur ». Ainsi, tel que présenté sur l'interface de la figure VI.8, l'identification des dommages se fait par familles de désordres, en l'occurrence, cinq pour cet élément.



Figure VI.8. Familles de dommages pouvant apparaître sur l'élément «Murs extérieurs».

Ensuite, comme donnée par l'exemple de la figure VI.9, EDPS renvoie le propriétaire vers d'avantages de détails concernant la famille de désordre identifiée.

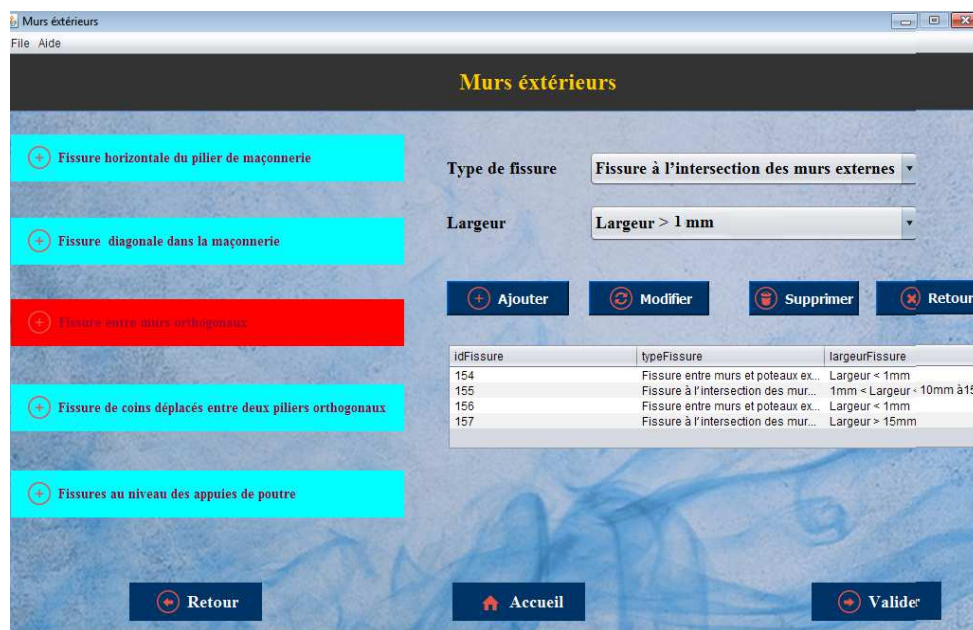


Figure VI.9. Exemple d'évaluation dans EDPS d'une famille de désordre.

b- Évaluation des façades

Cet élément tient compte des effets des ouvertures sur les murs de façade. Ainsi, comme indiqué sur la figure VI. 10, l'interface permet d'évaluer les dommages apparant sur ce même composant.

IdFissure	typeFissure	largeurFissure
158	Fissure à l'angle des portes ...	Largeur < 1mm
159	Fissure à l'angle des fenêtre...	Largeur < 1mm
160	Fissure à l'angle des portes ...	1mm < Largeur < 10mm à 15...
161	Fissure à l'angle des fenêtre...	1mm < Largeur < 10mm à 15...

Figure VI. 10. Inspection dans EDPS des murs de façade.

c- Évaluation de la Toiture inclinée

L'endommagement d'une toiture, figure VI.11., peut-être une source de danger pour les occupants de la construction, en particulier sous l'effet des répliques qui peuvent induire une chute de tuile.



Figure VI.11. Exemple d'une toiture endommagée.

L'inspection des dommages illustrés par la figure VI.11., se fait par l'intermédiaire de l'interface présentée sur la figure VI.12.

Remarque : le propriétaire est dirigé vers ces sous composants liés aux désordres sur les toitures, lorsqu'il désigne le cas « toiture inclinée » dans l'évaluation des éléments externes des composants.

IdFissure	typeFissure	largeurFissure	DescriptifFissure
198	Domage des poutres second.	null	Déconnection aux extrémités d.
199	Déplacement important sur le s.	fissuré < 1mm	
200	Déplacement important sur le s.	1mm < fissure < 10mm	

Figure VI.11. Évaluation dans EDPS de l'élément « toiture inclinée ».

Selon le dommage de la toiture, des sous informations sont données par EDPS et que le propriétaire se doit de compléter pour parfaire l'application. Ainsi, dans le cas où ce dernier confirme qu'il y a une chute de tuiles, les onglets : surface moyenne endommagée, partie endommagée...etc. sont à préciser. Si par contre, il y a défaillance dans l'état des éléments porteurs de la charpente, le propriétaire doit se positionner sur : nature du dommage, sa position sur l'élément, nombre d'éléments endommagés... etc. enfin, dans la troisième famille, on effectue l'identification des autres dommages peu fréquents.

VI.3.2.2. Évaluation des éléments internes de la construction

Une fois l'évaluation externe achevée, le propriétaire passe à l'inspection des composants internes de la construction.

a- Évaluation de la cage d'escalier

Comme montré sur la figure VI.12, les secousses sismiques engendrent des désordres considérables sur le composant « escalier », que l'on se doit d'évaluer. Ainsi, l'inspection de dommages survenus sur l'élément « escalier » est donnée sur l'interface VI.13.



Figure VI. 13. Présentation d'un escalier endommagé après séisme.

Escalier

File Aide

Escalier

type: Fissure du béton de la cage d'escalier

type de fissure: Fissure dans le palier de repos de la cage d'escalier avec évacuation du matériel

largeur de fissure: Largeur < 1 mm

Ajouter Supprimer

IdFissure	typeFissure	DescriptionFissure	largeurFissure
168	Fissure verticale dans la cage d'escalier	Fissure verticale entre deux murs orthogonaux	Largeur < 1 mm
169	Fissure horizontale dans la cage d'escalier	Fissure horizontale dans les extrémités du mur	Largeur < 1 mm
170	Fissure horizontale dans la cage d'escalier	Fissure horizontale entre marche et contre-marche	Largeur < 1 mm
171	Fissure horizontale dans la cage d'escalier	Fissure horizontale entre marche et contre-marche	Largeur < 1 mm
172	Fissure horizontale dans la cage d'escalier	Fissure dans le mur en gradin en dehors des marches	1mm < Largeur < 5 mm
173	Fissure horizontale dans la cage d'escalier	Fissure presque horizontale en dehors des marches	Largeur > 5 mm
174	Fissure en diagonale dans le mur de la cage d'escalier	null	1mm < Largeur < 5 mm
175	Fissure du béton de la cage d'escalier	Fissure le long du palissage de l'escalier dans la cage	Largeur < 1 mm
176	Fissure du béton de la cage d'escalier	Fissure le long du palissage de l'escalier dans la cage	Largeur < 1 mm
177	Fissure du béton de la cage d'escalier	Fissure dans le palier de repos de la cage d'escalier	1mm < Largeur < 5 mm

Retour Accueil Valider

Figure VI. 13. Inspection de l'élément «Escalier» avec l'EDPS.

Les désordres inspectés avec l'EDPS, doivent être ajoutés un par un suivant la procédure ci-dessous.

Sélectionner la famille des désordres auxquelles appartient le dommage inspecté.

Choisir le dommage correspondant au cas inspecté.

Sélectionner les différentes caractéristiques physiques de ce dommage (longueur, largeur, profondeur...etc.).

Enregistrement du dommage, en l'ajoutant au tableau des désordres.

L'évaluateur reprend les mêmes étapes jusqu'à ce que tous des dommages apparents soit introduit dans l'outil *EDPS*.

b- Éléments porteurs

La figure VI.14, illustre un élément porteur endommagé sous l'effet d'un séisme.



Figure VI.14. Présentation d'un poteau endommagé.

La figure VI.15 présente l'interface permettant au propriétaire l'évaluation de ce type de dommage. Ce dernier est désigné selon le cheminement suivant :

Sélectionner pour chaque dommage la famille de désordres auxquelles le propriétaire appartient.

Introduire les différentes caractéristiques physiques appartenant à chaque dommage.

Enregistrement du désordre.

Éléments porteurs

Remplissage de poteau sur toute sa hauteur ☐

☐ Eclatement du béton
 ☐ Fissure horizontale
 ☐ Fissure verticale
 ☐ Ecaillage du béton
 ☐ Fissure

Type de fissure:

Largeur:

IDFissure	TypeFissure	DescriptionFissure
178	Eclatement du béton à la base ou à la hauteur d...	Avec éclatement des aciers longitudinaux
180	Eclatement du béton à la base ou à la hauteur d...	Sans éclatement des aciers longitudinaux
182	Eclatement du béton à la base et à la hauteur d...	Avec éclatement des aciers longitudinaux

Figure VI.15. Évaluation du composant « Élément porteur » avec *EDPS*.

c- Éléments de contreventements

Dans le cas où la structure est de type poteau-poutre, son système de contreventement est assuré par les portiques. La figure VI.16., présente un cas de portique endommagé sous l'effet d'un séisme.



Figure VI.16. Présentation d'un élément de contreventement endommagé.

L'évaluation du niveau de dommage de ce composant est effectuée par l'interface présentée sur la figure VI.17.

Eléments de contreventement

☐ Fissure horizontale
 ☒ Fissure aux extrémités de la poutre
 ☐ Fissure diagonale
 ☐ Fissuration du noeud
 ☐ Déplacement du poutre
 ☐ Eclatement

Type de la fissure :

Largeur de la fissure :

☐ Evacuation du matériau

IdFissure	typeFissure	largeurFissure	DescriptionFissure
184	Fissure dans une extrémité de la ...	Fissure < 1mm	Avec évacuation du matériau
185	Fissure dans les deux extrémités ...	Fissure > 2 mm	Avec évacuation du matériau
186	Fissure dans les deux extrémités ...	Fissure < 1mm	Sans évacuation du matériau

Figure VI.17. Inspection dans EDPS du composant «Éléments de contreventement».

L'inspection avec l'interface présentée à la figure ci-dessus se déroule en quatre étapes, à savoir :

Sélection de l'une des familles de dommages données en haut de l'interface.

Choix du type de dommage.

Introduction des différentes caractéristiques physiques relatives aux dommages inspectés.

Enregistrement du dommage inspecté en l'ajoutant au tableau des désordres.

d- Évaluation des murs intérieurs

Malgré le fait que l'élément «mur intérieur» est considéré comme étant un composant secondaire, son endommagement peut être une source de danger pour les occupants sous l'effet des répliques. La figure VI.18., illustre un cas réel de mur intérieur endommagé.



Figure VI.18. Mur intérieur endommagé.

La prise en compte de ces dommages dans le cas d'évaluation avec l'outil EDPS, ce fait par l'intermédiaire de l'interface présentée sur la figure VI.19.

ID fissure	Type fissure	Largeur fissure
162	Fissure horizontale au sommet du pilier	Fissure + 1mm
167	Fissure en diagonale dans le mur	1mm < Fissure < 10 à 15 mm

Figure VI. 19. Inspection de l'élément «mur intérieur».

Suivant ce qui est présenté dans la figure VI.19, l'inspection de cet élément peut être subdivisée en trois étapes, à savoir :

Sélection de la partie de l'élément à évaluer parmi les quatre proposées.

Introduction du type de dommage et ses caractéristiques physiques

Enregistrement du dommage

e- Évaluation des planchers

Selon que les dommages soient superficiels ou profond, il incombe à l'outil de donner l'instruction au propriétaire de regagner son logement ou de l'évacuer. Des exemples de dommages dans les plancher sont montrés sur la figure VI.20.



Figure VI.20. Dommages occasionnés à l'élément «Planchers».

Dans EDPS, l'inspection de ces planchers et montré sur les figures VI.21 et VI.22.

idFissure	typeFissure	largeurFissure	DescriptionFissure
188	Fissure horizontale du plancher	Fissure < 1mm	Surface < 10%
189	Fissure (en 45°) dans les coins des ...	1mm < Fissure < 10mm	
190	Fissure sur revêtements du sol	Fissure < 1mm	
191	Décalage entre les composantes du ...		Surface < 10%
192	Décalage entre les composantes du ...		10% < Surface < 25%

Figure VI.21. Évaluation des désordres occasionnés à l'élément Plancher (image 1).

Plancher Supérieur

Type de la fissure :

Largeur de la fissure :

Surface de la fissure :

Evacuation du matériau :

idFissure	typeFissure	largeurFissure	DescriptionFissure
197	Glissement des poutres secondaires	Fissure < 1mm	Surface < 10%
193	Chute de portion de plâtre		Surface < 10%
194	Chute de portion de plâtre		Surface < 10%
195	Fissure 45° au coin du plafond	Fissure < 1mm	Avec évacuation du matériau
196	Fissure parallèle aux solives au pourtr...	1mm < Fissure < 10mm	Avec évacuation du matériau

Figure VI.22. Évaluation des désordres occasionnés à l'élément Plancher (image 2).

Les deux interfaces présentées par les figures VI.21., et VI.22., permettent au propriétaire d'inspecter respectivement la partie inférieure et supérieure de l'élément « plancher ». Malgré le fait, que les dommages qui se manifestent différent sur ces deux parties, lors de l'évaluation, la même procédure est suivie. Ainsi, dans les deux cas, l'évaluateur doit procéder à :

L'identification de la nature et de la position du dommage,

Puis, l'introduction des différentes caractéristiques physiques de ce même dommage,

Ensuite, l'évaluateur doit déterminer approximativement la surface sur la quelle ce type de dommage est apparu.

Enfin, le propriétaire ajout ce dommage au tableau des désordres.

Cette démarche doit se répéter jusqu'à ce que l'intégralité des désordres apparus sur les deux parties de l'élément soient prises en considération.

f- Évaluation de la Cheminée

Les figures VI.23 et VI.24 présente respectivement un cas de dommage sur élément « Cheminée » ainsi que son évaluation avec l'outil développé.

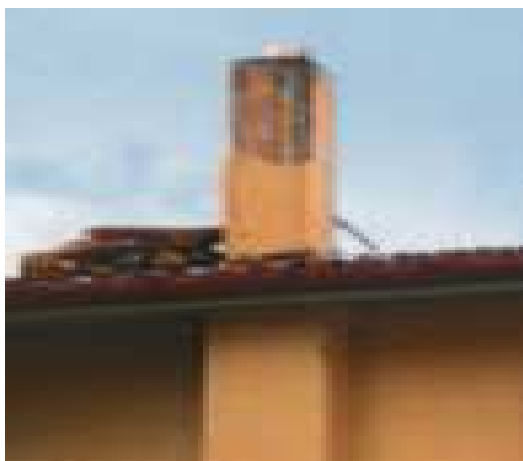


Figure VI.23. Dommage apparu sur l'élément «Cheminée».

Eléments extérieurs Cheminée

☐ Evaluation de l'extérieur ☒ Evaluation de l'intérieur

☐ Fissure entre sol du foyer et le socle ☐ Fissure entre linteau et l'élément de jambage ☒ Fissure au niveau du conduit de la cheminée
☐ Fissure entre l'élément de jambage et la maçonnerie interne de la chambre ☐ Fissure entre maçonnerie interne et éléments horizontaux

☐ Fissure < 1mm ☒ Fissure > 1mm ☐ Nombre important de fissure ☐ Evacuation de matériau ☒ Fissure traversante ☐ Avec linteau ☐ Avec sol

+ Ajouter
 Supprimer
 Annuler

idFissure	typeFissure	largeurFissure	DescriptionFissure
201	Fissure entre élément de jambage...	Fissure > 1mm	null
202	Fissure entre linteau et élément d...	Fissure < 1mm	null
203	Fissure entre sol du foyer et le s...	Fissure > 1mm	fissure traversante
204	Fissure au niveau du conduit de l...	Fissure > 1mm	fissure traversante

Retour Accueil Valider

Figure VI.24. Interface pour l'évaluation de l'élément «Cheminée».

Tel qu'illustré sur la figure VI.24, l'inspection de l'élément «Cheminée» peut se faire de l'intérieur ou de l'extérieur. Selon le cas, le propriétaire commence l'inspection par le choix de la famille de dommage, suivie de la sélection du type de désordre. Après la phase de sélection, l'évaluateur doit introduire les différents paramètres physiques qui caractérisent le dommage en question. Une fois toutes les données introduites, l'évaluateur enregistre le dommage dans le tableau des désordres.

g- Évaluation de l'élément «Balcon»

Malgré le fait que les balcons sont considérés comme étant des éléments secondaires, leur endommagement peut engendrer un risque imminent. Les figures VI.25, et VI.26

montres respectivement un exemple sur ce type de dommage et son évaluation par l'interface de d'outil *EDPS*.



Figure VI.25. Présentation d'un élément «Balcon» endommagé.

Eléments extérieurs Balcon

☒ Sol du balcon est un élément du plancher ☒ Elément garde corps en acier ☐ Déconnection entre barres et sol du balcon ☒ Déconnection entre barres et remplissage
☐ Sol du balcon est un élément en préfabrique ☐ Elément garde corps en maçonnerie ☐ Avec poteau de chaînage ☒ Sans poteau de chaînage
☐ Fissure entre mur et remplissage extérieur ☐ Fissure entre mur et poteau de chaînage ☒ Fissure entre murs orthogonaux ☒ Fissure traversante
☐ Fissure < 1mm ☒ 1mm < Fissure < 5mm ☐ Fissure > 5mm ☐ Déconnection entre les éléments ☐ Renversement total de la maçonnerie ☒ Renversement partiel de

+ Ajouter
 - Supprimer
 X Annuler
 + Valider

IdFissure	typeFissure	largeurFissure	DescriptionFissure
205	Sol du balcon est un élément du plan...	Fissure > 5mm	Fissure entre mur et poteau
206	Sol du balcon est un élément du plan...	1mm < Fissure < 5mm	Fissure entre mur et remplis
207	Sol du balcon est un élément du plan...	Fissure < 1mm	Fissure travesante entre mur
208	Sol du balcon est un élément en préf...	Fissure < 1mm	Fissure traversante entre mu
209	Sol du balcon est un élément du plan...	1mm < Fissure < 5mm	Fissure traversante entre mu

Retour Accueil Valider

Figure VI.26. Interface permettant d'inspecter l'élément « Balcon ».

L'introduction des différents désordres qui apparaissent sur l'élément balcon se fait par plusieurs étapes. Dans la 1^{ère} étape, l'évaluateur doit identifier la partie du balcon qui est endommagée (ou bien de choisir une d'entre elles, dans le cas où il y'a plusieurs), dans la 2^{ème}, il sélectionne à la fois les désordres constatés et leurs caractéristiques physiques. Puis, une validation de l'inspection se fait durant la 3^{ème} étape.

VI.3.3. Estimation du niveau de dommage global

Afin de distinguer entre un élément Résistant et non-Résistant, *EDPS* procède à un tri, suivant la nature des éléments inspectés. Par la suite, ces composants sont classés en sous-ensemble d'élément, notés D_{ER} et D_{ES} respectivement. Ce classement effectué selon le rôle de chaque élément, étant lui-même fonction de la typologie de la structure. Systématiquement, cette étape est suivie d'un calcul permettant d'estimer le niveau de dommage « D_G ».

Prenons comme exemple deux éléments « Murs » et « Balcon », illustrés dans les figures VI.18 et VI.25, respectivement. Le niveau de dommage constaté sur l'élément « Balcon » est enregistré en *élément secondaire* sous la grandeur D_{EE} . Par contre, le degré de dommage constaté sur l'élément « Mur en maçonnerie » peut être classé sous deux grandeurs différentes : D_{EI} (élément non-résistant) ou D_{EP} (élément résistant) selon la typologie de la construction, poteaux-poutres /voiles ou maçonnerie, respectivement. Une fois l'évaluation achevée, des recommandations sont données sur les mesures à prendre immédiatement par le propriétaire (figure VI.27).

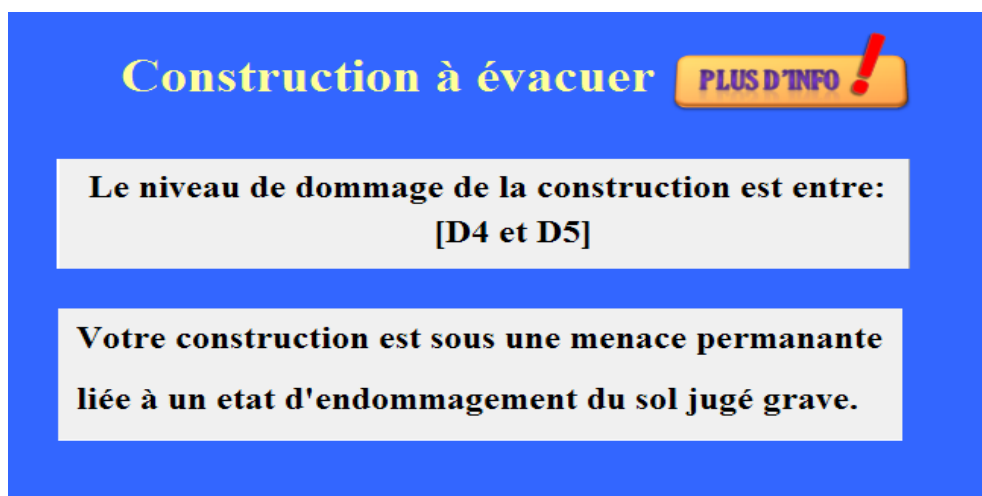


Figure VI.27. Réponse finale de l'EDPS dans le cas d'évaluation par propriétaire.

Ces mesures sont relatives au degré de dommage global calculé, D_G (le calcul se fait suivant les trois modèles mathématiques développés) ou bien par un classement systématique (par rapport à l'environnement de la structure).

VI.4. Cas d'évaluation par Expert

La mise en application de l'outil *EDPS* dans le cas d'une évaluation par Expert est établie en parallèle avec la méthode existante. Les étapes d'inspection par Expert sont similaires à celles données par la fiche d'évaluation utilisée actuellement en Algérie. A

noter, que cette inspection visuelle peut-être effectuer suite à une visite extérieure et/ou intérieure, lorsque cela est possible.

VI.4.1. Phase d'Authentification

Une évaluation par *Expert* commence nécessairement, par l'authentification de l'utilisateur de l'outil, en tant qu' « Expert » du domaine (figure VI.28). Ainsi, le système vérifie et confirme l'existence de cet Expert.

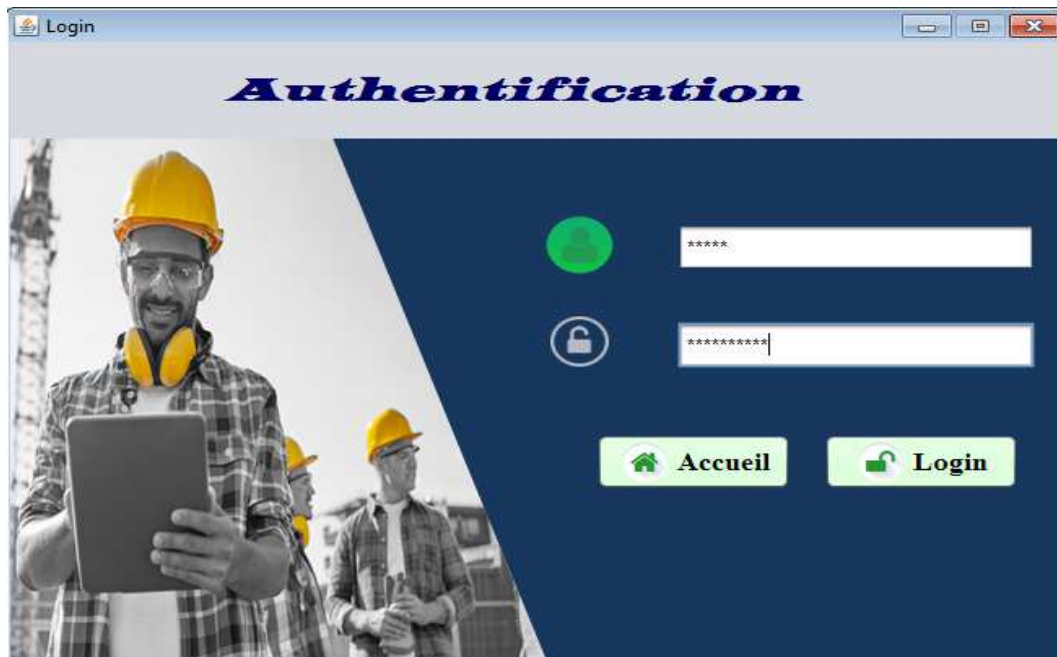


Figure VI.28. Authentification de l'expert.

Une fois la phase d'identification accomplie (le système vérifie l'existence et confirme que l'utilisateur est bien expert). *EDPS* permet à l'utilisateur d'accéder à l'interface Expert, comme montré sur la figure VI.29.

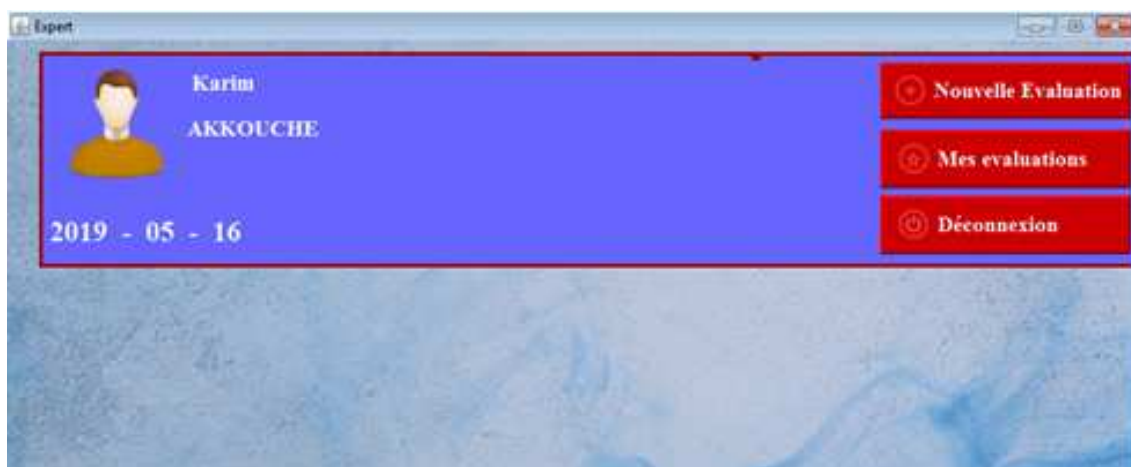


Figure VI. 29. Première interface de l'évaluation par Expert.

A partir de cette interface, l'expert peut effectuer plusieurs tâches, à savoir : entamer une autre évaluation, consulter les différentes inspections effectuées. Dans le cas où la première option est sélectionnée, l'EDPS renvoi l'utilisateur à l'étape dite, d'avant inspection, afin d'introduire les informations générale sur la construction (figure VI.30).

VI.4.2. Phase d'avant inspection

Dans cette phase d'évaluation, l'expert introduit certaines informations relatives à lui-même et à la construction (figure VI.30.).

Figure VI.30. Introduction d'informations d'ordres générales.

Ensuite, *EDPS* mène son premier tri sur la *BC*, afin de sélectionner les connaissances nécessaires au cas étudié.

Enfin, l'expert peut entamer l'inspection des différents éléments de la construction.

VI.4.3. Phase d'inspection de l'environnement de la construction

Comme montré sur la figure VI.31., l'Expert entame l'inspection, en commençant par l'évaluation de l'environnement, à savoir : le sol autour de la construction et les structures adjacentes.



Figure VI.31. Identification des désordres autour de la construction.

Dans le cas où l'Expert affirme la présence de l'une des deux menaces décrites précédemment, *EDPS* signale à l'évaluateur la présence d'un danger.



Figure VI. 32. Message d'alerte pour l'Expert.

L'évaluateur peut à ce stade, arrêter ou continuer son inspection en cliquant sur « Non », ou « Oui », respectivement. Ainsi, dans le cas où la réponse est favorable *EDPS* renvoie l'Expert à l'étape suivante.

VI.4.4. Phase d'évaluation de l'infrastructure

Dans cette phase, l'expert inspecte les différents désordres qui peuvent se manifester sur les éléments : Fondation et Infrastructures.



Figure IV. 33. Interface pour l'évaluation de l'infrastructure.

Dans l'interface présentée sur la figure VI.33, l'expert évalue la partie encadrée de la construction en deux étapes : L'expert introduit toutes les informations relatives aux fondations, puis, il introduit des données informant sur l'état de dommages de l'infrastructure. Une fois accomplie, *EDPS* renvoi l'expert à l'inspection des éléments structuraux et non-structuraux.

VI.4.5. Phase d'évaluation des éléments structuraux et non-structuraux

Une réflexion particulière est accordée à cette étape. En effet, les éléments structuraux constituent la partie la plus importante, d'un point de vue mécanique, car ils assurent la transmission des charges horizontales et verticales, garantissant ainsi la sécurité du bâtiment. Cependant, les éléments non structuraux ne sont pas moins importants, puisqu'ils assurent la convivialité du bâtiment avec un coût total représentant la majeure partie de la valeur du bâtiment.

Pour atteindre l'objectif de cette phase, les résultats liés à l'état de dommage des éléments structuraux et non-structuraux, obtenus lors de l'inspection réalisée avec le formulaire ont été utilisés dans cette partie de l'étude. La fiche utilisée dans ce cas, a été remplie par l'équipe d'enquête poste-sismique, lors de l'investigation des dommages occasionnés par le séisme de 2003 à Boumerdes. Le détail de l'évaluation porté sur cette fiche est donné sur le tableau VI.1.

Tableau VI.1. Résumé de la fiche d'évaluation utilisée.

Construction	Dommages relevés sur les composants								Dommage global D_G	
	Structuraux				Non structuraux				Par la fiche	Par EDPS
	D_{EP}	D_{EC}	D_{TI}	D_{EPT}	D_{ESC}	D_{ERE}	D_{EI}	D_{EE}	D_{G1}	D_{G2}
1	3	4	/	3	4	3	2	2	4	4

Remarque : la structure considérée dans cette partie, n'a pas été utilisée dans l'établissement des trois modèles donnés par les équations 1, 2 et 3.

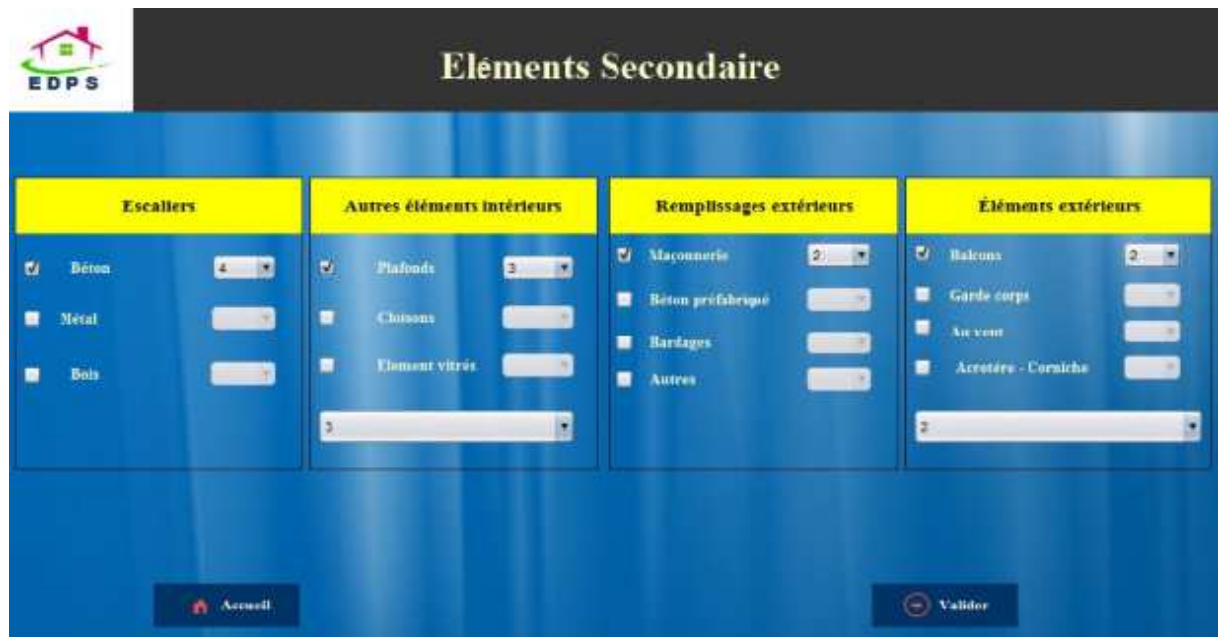
Pour la classification d'un élément, un ensemble de considérations sont prises en compte. On cite, le type de dommage, sa position, sa profondeur, sa diffusion, le nombre d'élément endommagéetc. Les différentes catégories de dommages accordées aux composants structuraux et non-structuraux sont introduites dans l'outil EDPS, sous forme de valeurs numériques (voir les figures VI.34 et VI.35).

Structure Résistante

Elément porteur (charge verticale)	Elément de contreventement	Toiture inclinée	Plancher - toiture terrasse
Murs en maçonnerie	Murs en maçonnerie	Charpente métallique	☒ Béton armé: 3
Voids béton	Voids béton	Charpente bois	☐ Solives métalliques
Poteau métallique	Portiques béton armé: 4	Couverture tôle	☐ Solive bois
Poteau bois	Portiques métalliques	Couverture amiante ciment	
Poteau béton armé: 3	Palées triangulées	Couverture métallique	
Autre	Autre		

Accueil Valider

Figure VI.34. Évaluation des éléments structuraux.



Escaliers	Autres éléments intérieurs	Remplissages extérieurs	Éléments extérieurs
☒ Béton 4	☒ Plafonds 3	☒ Maçonnerie 2	☒ Balcons 2
☐ Métal	☐ Cloisons	☐ Béton préfabriqué	☐ Garde corps
☐ Bois	☐ Element vitrés	☐ Bardages	☐ Au vent
		☐ Autres	☐ Accroches - Corniche

Accueil Valider

Figure VI.35. Évaluation des éléments non-structuraux.

Après identification des dommages des divers composants constitutifs, *EDPS* passe à l'étape d'estimation du niveau de dommage global.

VI.4.6. Phase d'évaluation de la catégorie de dommage globale

Dans le cas où l'évaluation est menée par le formulaire d'évaluation, l'expert doit comptabiliser le niveau de dommage global du bâtiment D_{G1} (Tableau VI.1). Par contre, dans le cas où l'évaluation est menée par l'outil *EDPS*, systématiquement, le niveau de dommage D_{G2} (Tableau VI.1) est calculé en fonction de l'importance des désordres relevés sur les différents éléments. Ainsi, le résultat final obtenu par *EDPS* est présenté par l'interface de la figure VI.36.



Evaluation finale de la construction

Le niveau de dommage de cette construction est : 4

Dommages importants

Figure VI.36. Réponse finale donnée par *EDPS*.

A chaque niveau de dommage global, correspond une couleur spécifique utilisée pour baliser l'entrée du bâtiment, afin que les services de sécurité et les utilisateurs sachent s'ils peuvent ou non avoir accès au bâtiment, cas de dommages légers ou importants, respectivement

VI.5. Conclusions

La diversité des consommateurs de l'*EDPS* peut faire de lui un outil indispensable à la gestion de la situation post-sismique. Parmi-eux, on distingue deux cas de figures:

- Cas d'évaluation menée par « Expert » : basée sur cinq niveaux de dommages (D_1 à D_5) proches de l'échelle proposée par l'EMS-98,
- Cas d'évaluation menée par « Propriétaire » : établie selon trois classes de dommages proposées par (Baguio et al. 2007) allant de catégorie C_1 à C_3 .

Après l'identification, l'outil classe et traite toutes les informations nécessaires à la gestion des situations d'urgence sismique, en présentant les résultats finals (D_G) sous forme d'un tableau, donnant le nombre de constructions endommagées (par niveau de dommage), le nombre de sans-abris, le nombre de décès et de disparus, cela à différentes échelles d'une structure, d'un quartier, d'une zone ou d'une ville. *EDPS* permet également, de sensibiliser les propriétaires aux dangers qu'ils encourent suite à l'utilisation de leurs constructions. En outre, l'outil développé facilite l'accès à diverses données pour les décideurs, les employeurs et le public.

Conclusion Générale et perspectives

Conclusion Générale et perspectives

La gestion post-sismique de l'habitabilité des logements endommagés est très complexe. Autoriser les citoyens à regagner leurs domiciles, ou leurs interdire l'accès relèvent des prérogatives des autorités chargées des inspections. Les séismes récents ayant touchés l'Algérie ont montré cette complexité. Chaque logement touché doit être expertisé et une décision es retenue :

- Accès tout de suite;
- Accès après renforcement;
- Démolition.

Afin de répondre à ces questions et dans les premiers jours qui suivent le séisme que cette recherche a vu le jour.

Les séismes d'El-Asnam et de Boumerdes, pour ne citer que ceux-là, représentent l'épreuve et l'expérience qui a conduit au développement et à l'amélioration du système de gestion de crise post-catastrophe en Algérie.

Après un tremblement de terre, l'utilisation des bâtiments joue un rôle important dans la récupération des activités sociales et économiques essentielles, des communautés affectées. Pourtant, la ré-exploitation d'une structure représente une décision importante, impliquant ainsi :

- Une insécurité pour les individus, dans le cas où le niveau de dommage est sous-estimé; en raison de la possibilité de répliques significatives ;
- Un nombre de sans-abris importants et des coûts d'indemnisation très élevés.

À cet effet, l'évaluation des bâtiments, à la fois privés (pour leur nombre) et publics (pour leur fonction) est considérée comme l'une des tâches les plus cruciales dans la gestion efficace des situations d'urgence. Parmi les problèmes rencontrés durant cette phase, nous pouvons citer ceux liés :

- À la subjectivité de quelques résultats due à des inspections non-conformes (équipe n'ayant pas le niveau qualitatif requis);
- Aux délais de ces mêmes inspections, qui causent des désarroi aux occupants nécessitant la réintégration de leurs domiciles peu de temps après le passage de l'onde principale ;
- Aux nombre d'expert qui est souvent insuffisant dans la zone touchée.

Pour remédier à ces problèmes c.-à-d. faciliter le processus de gestion de crises post-sismique, plusieurs approches ont été développées dans le domaine d'inspection de dommages. Parmi-elles :

Conclusion Générale et perspectives

- *Les Méthodes d'inspections classiques*: le principe d'utilisation consiste à remplir un formulaire regroupant un certain nombre d'informations. Selon l'importance de ces connaissances, l'évaluateur procède à une prise de décision.
- *Les Méthode d'inspections modernes*: dans ce cas, les approches proposées peuvent être regroupées en deux grandes familles. Dans la première, nous retrouvons celles qui sont appliquées à l'échelle d'un quartier ou d'une ville, telle que l'approche qui se base sur l'imagerie satellitaire (haute résolution). Dans la deuxième, nous retrouvons celles qui sont appliquées à l'échelle d'une construction, telle que les approches qui se basent sur la théorie de l'intelligence artificielle ; les systèmes experts, la logique floue, les réseaux neurones... etc.

Dans le présent travail de recherche, un nouvel outil d'inspection de dommages est élaboré suivant les fondements de base de la théorie des systèmes experts à base de connaissances. Cet outil nommé *EDPS (Évaluation de Dommage Post-Sismique)*, a pour objectif de statuer sur l'habitabilité ou pas, des structures endommagées d'une manière quantitative. Pour ce faire, cette étude a été partagée en deux parties :

- *La première partie* : Après analyse des données, plusieurs constats ont été établis, au vu des résultats consignés sur les formulaires utilisés. Dans l'objectif d'apporter des régulations optimales sur les paramètres influents, trois modèles ont été développés sur la base de la théorie des plans d'expériences. Ces modèles permettent l'appréciation du niveau de dommage :

- De tous les éléments constituant la structure secondaire, D_{ENR} ;
- De tous les éléments qui composent la structure porteuse, D_{ER} ;
- De la construction, D_G .

Sur la base des résultats obtenus et dans le cas où le dommage est constaté uniquement sur l'un des groupes de composants, il peut être proposé que la prise de décision de l'inspecteur s'appuie à :

- 80% sur la situation de la structure porteuse, lorsque le dommage est constaté sur ce groupe d'éléments.
- 50% sur la situation de la structure secondaire, lorsque le dommage est constaté sur ce groupe d'éléments.

L'atteinte des deux sous-groupes d'éléments implique une sous-estimation de leurs effets respectifs dans la prise de décision, puisque les considérations économiques doivent également être prises en compte.

Conclusion Générale et perspectives

- *La deuxième partie* : Cette partie est consacrée au développement de l'outil *EDPS*. Pour faciliter l'utilisation de cet outil, après sélection des différentes catégories d'utilisations (Administrateur, Expert et Propriétaire), nous l'avons doté de quatre modules, à savoir ; un module d'aide, un module d'explication, un module d'interface et un module d'acquisition de connaissances. Les connaissances implémentées dans l'outil sont représentées par un ensemble de règles et de faits collectés de sources diverses, en particulier :

- Capitalisation du retour d'expérience, par interviews auprès d'experts qualifiés des organismes du CTC.
- Traitement d'une banque de données constituée de 8 398 fiches d'expertises issues de l'enquête post-sismique du séisme de Boumerdes en 2003.
- Traitement des conclusions contenues dans divers ouvrages publiés (articles, livres, rapports de mission ...etc.).

Pour bien représenter le raisonnement effectué sur les connaissances implémentées, nous avons opté pour le formalisme logique offert par le moteur d'inférence Prolog.

Aussi, en fonction du type d'utilisateur, *EDPS* peut procurer plusieurs avantages, à savoir :

- *Cas d'utilisation par ingénieur non expert* : l'outil permet de bénéficier de l'expérience et des compétences d'experts du domaine, en particulier lors de la prise de décision.
- *Cas d'utilisation par propriétaire* : l'*EDPS* l'initie à la tâche d'inspection de dommages et l'incite à prendre conscience du danger auquel il est exposé.

Parmi les résultats générés par l'*EDPS*, on note :

- Les mesures immédiates à entreprendre, cas d'évaluation par propriétaire.
- Une catégorisation du niveau de dommage global, proportionnellement au niveau de dommages des différents composants (structuraux et non-structuraux), cas d'évaluation expert.
- Les dispositions prises par les autorités pour l'accueil des victimes, telles que le nombre de centres d'accueil à court et à long terme, les centres de soins pour les blessés (nombre de lits, nombre d'employés, etc.), cas d'utilisation Administrateur.
- L'estimation budgétaire réservée à l'indemnisation des victimes, cas d'utilisation Administrateur.

En fonction de ces résultats, l'*EDPS* classe et traite toutes les informations nécessaires à la gestion de la situation. Puis présentés sous forme de tableaux et incluant le nombre de

Conclusion Générale et perspectives

bâtiments endommagés (par niveau de dommages), le nombre de personnes sans-abri, le nombre de morts et de disparus.

Enfin, des recherches supplémentaires sont nécessaires et peuvent faire l'objet de travaux futurs. Ainsi, Il est envisagé d'étendre l'application à :

- L'inspection des dommages sur les structures hydrauliques et les ouvrages d'arts.
- L'évaluation de la vulnérabilité des structures.
- Conversion de l'outil en une Application Système Androïd gratuite.
- Rajouter un module métré qui permet de trancher sur les catégories de dommages O_4 et R_5 .

Références bibliographiques

1. ATC 20. (1989). Procedures for post-earthquake safety evaluation of buildings. *Applied Technology Council*, Redwood City, California.
2. AFPS : Association Française de génie ParaSismique. (2003). Le séisme du 21 Mai 2003 en Algérie. Rapport de mission. <http://www.afps-seisme.org/PUBLI/Rapports-de-missions/AFPS-Rapport-mission-2003-Seisme-Boumerdes-Algerie>. Accessed 03 Dec 2018.
3. Anagnostopoulos, S. & Moretti, M. (2008). Post-earthquake emergency assessment of building damage, safety and usability-Part 1: Technical issues. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 223–232.
4. AFPS : Association Française de génie ParaSismique. (2012). La séquence sismique de Mai 2012 en Emilie-Romagne (région de Ferrara à Modena) Rapport de mission. <http://www.afps-seisme.org/content/search?SearchText=Rapport+de+mission+Modena2012>. Accessed 03 Dec 2018.
5. Auclair, S. Monfort, D. Colas, B. Langer, T. & Perrier, P. (2015). Évaluation rapide des bilans matériels et humains : une aide essentielle à la gestion opérationnelle des crises sismiques. 9^{ème} Colloque National AFPS 2015. Champs-sur-Marne, France.
6. Auclair, S. Monfort-Climent, D. Colas, B. Langer, T. & Bertil, D. (2014). Outils de réponse rapide pour la gestion opérationnelle de crises sismiques. SAGEO2014, Nov 2014, Grenoble, France.
7. Abbacha I. (2015). Étude de la sismicité de la région Nord-Est de l'Algérie. Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Sétif. Algérie.
8. Allali, S. A. Abed, M. Mebarki, A. (2018). Post-earthquake assessment of buildings damage using fuzzy logic. *Engineering Structures*, 117-127.
9. Akkouche K. Bouzid L. Nekkouché A. Hannachi N. E. & HAMIZI M. (2018). Évaluation de la vulnérabilité des structures poteau-poutre en béton armé par la méthode des plans d'expériences. La 1^{ère} Conférence Internationale sur la Vulnérabilité et la Réhabilitation des Structures (VUREST2018), 07 et 08 Mai, Alger, Algérie.
10. Akkouche K., Hannachi N.E., Hamizi M., Khelil N., K., & Daoui M. (2019). Knowledge-based system for damage assessment after earthquake: Algerian buildings case. *Asian journal of civil engineering*, 20(6), 769-784.
11. Bertero, V. & Haresh, S. (1983). El-Asnam, Algeria Earthquake October 10, 1980: A Reconnaissance and Engineering Report. <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NSF/PB85110740.pdf>. Accessed 02 Dec 2018.
12. Bratlok I. (1986). Prolog Programming for Artificial Intelligence. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
13. Box G.E.P., & Draper N.R. (1987). Empirical Model Building and Responses Surfaces. Wiley. New York.
14. Bounif, A. Haessler, H. & Meghraoui, M. (1987). The Constantine (Northeast-Algeria) earthquake of October 27, 1985: surface ruptures and aftershocks study, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 85, 451-460.

15. Benoist D., Tourbier Y., & Germain-Tourbier S. (1995). Plans d'expériences : construction et analyse. Tec et Doc, Paris.
16. Benouar, D. (1996). Seismic hazard evaluation at Algiers using Benouar's catalogue. *Natural Hazard Journal*, 13(2), 119-131.
17. Badiru A.B., & Cheung J. (2002). Fuzzy Engineering Expert Systems with Neural Network Applications. New York.
18. Bendimerad, F. (2002). *A Global Action Plan to Reduce Risk to Megacities in Developing Countries*. Second Annual IIASA-DPRI Meeting "Integrated Disaster Risk Management: Megacity Vulnerability and Resilience". Laxenburg, Autriche.
19. Baggio C, Bernardini A, Colozza R, Corazza L, Della Bella M, Di Pasquale G, et al. (2007). Field manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term counter measures (AeDES). European Commission—Joint Research Centre—Institute for the Protection and Security of the Citizen, EUR.
20. Belazougui, M. (2008). Boumerdes Algeria earthquake of May 21, 2003: Damage analysis and behavior of beam-column reinforced concrete structures. Proc. 14th World Conf.on Earthquake Engineering, Beijing, China, CD-ROM.
21. Brunner, D. Lemoine, G. & Bruzzone, L. (2010). Earthquake damage assessment of building VHR optical and SAR imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote sens.* 48, 2403-2420.
22. Bosi, A. Marazzi, F. Pinto, A. & Tsionis, G. (2011). *The L'Aquila (Italy) earthquake of 6 April 2009: report and analysis from a field mission*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
23. Boukri, M. Farsi, M. N. Mebarki, A. & Belazougui, M. (2013). Development of an integrated approach for Algerian building seismic damage assessment. *Structural Engineering and Mechanics*, 47(4), 471–493.
24. Boukais S. Kezman A. & Nekmouche A. (2015). Influence du renforcement des zones nodales de portique etage par des plaques composites.
25. Boukri, M., Farsi, M. N., Mebarki, A., Belazougui, M., Amellal, O., et al. (2014). seismic risk and damage prediction: case of the building in Constantine city (Algérie). *Bull Earthq Eng*, 12 (2), 683-704.
26. Boukri M. Farsi, M. N., Mebarki, A., Belazougui, M., et al. (2018). Seismic vulnerability assessment at urban scale: Case of Algerian buildings. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 555-575.
27. Barkavi, T. & Natarajan, C. (2018). Knowledge-based decision support system for identification of crack causes in concrete buildings. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19 (2), 111-120.
28. Coburn, A.W. (1989). Seismic vulnerability and risk reduction strategies for housing in Eastern Turkey, Dissertation for Ph.D., Univ. of Cambridge, 1-212.
29. Covington, M. A. Nute, D. & Vellino, A. (1995). Prolog Programming in Depth. Edition September.
30. Conallen. J. (2000). Modélisation des applications Web avec UML. Edition Eyrolles.
31. Coburn A. & Spence R. (2002). Earthquake Protection, 2nd Ed., John Wiley and Sons, London

32. Chiriou, L. (2005). Damage assessment of the 2003 Bam, Iran earthquake using Ikonos imagery. *Earthquake Spectra*, 21(S1), 219–224.
33. Chassiakos A.P., Vagiots P., & Theodorakopoulos D.D. (2005). A knowledge-based system for maintenance planning of highway concrete bridges. *Advances in Engineering Software*. 36(11),740-749
34. Chlela, F. (2008). Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Énergie électrique. Université de La Rochelle, France.
35. Cancino, C., Farneth, S., Garnier, P., Vargas Neumann, J., & Webster, F. (2009). Damage Assessment of Historic Earthen Buildings after the August 15, 2007 Pisco, Peru Earthquake. Los Angeles, CA: Getty Conservation Institute, http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/damageassessment. Accessed 01 Dec 2018.
36. Churilov, S. (2009). Expert system for seismic vulnerability assessment of masonry structures. *Protection of Historical Buildings*, 1449-1454.
37. Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE). (2010). *General guidelines for the assessment and repair of earthquake damage in residential woodframe buildings*. Richmond: Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering.
38. Carreño, M. L. Cardona, O. D. & Barbat A. H. (2010). Computational Tool for post-earthquake evaluation of damage in buildings. *Earthquake Spectra*, 26(1), 63–86.
39. Carreño, M. L., Cardona, O. D., & Barbat, A. H. (2010). Computational tool for post-earthquake evaluation of damage in buildings. *Earthquake Spectra*, 26(1), 63–86.
40. Cacciotti R., Valach J., Kuneš P., & Čerňanský M. (2013). Knowledge-based system for documentation and mitigation of damages in historical structures. Central Europe towards Sustainable Building (CESB13), Prague.
41. Droesbeke J. J. Fine, J. & Saporta, G. (1997). Plans d'expériences : applications à l'entreprise, Éditions Technep. Paris.
42. Dagnelie, P. (2000). La planification des expériences : choix des traitements et dispositif expérimental (avec discussion). *J. Soc. Franç. Stat.* 141(1-2), 5-69.
43. Devyatkov, V.V. (2001). Artificial Intelligence Systems: Study manual for higher education institutions / V.V. Devyatkov; Chief Editor I.B.Fedorov. - Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University.
44. Delannoy C. 2001. Programmer en Java, Eyrolles, 5^{ème} édition série best of Java. [http://www-sop.inria.fr/acacia/personnel/itey\(jdbc=08/01/2001\)](http://www-sop.inria.fr/acacia/personnel/itey(jdbc=08/01/2001)).
45. Donahue J. O. (2002). Java database programming bible. Editeur: John Wiley & Sons.
46. Davidovici V. (2003). Séisme de Boumerdes du 21 mai 2003, Rapport préliminaire du Ministère de l'Habitat, Rapport de Mission, Dynamique Concept, 23 Juillet 2003.
47. Dewson R. (2009). SQL Server for developers from novice to professional. Edition APress.
48. Davidovici, V. (2010). Séisme de Port-au-Prince, Haïti 12 janvier 2010, Mission Interministérielle de la France du 5 au 9 février 2010, Rapport d'expertise des bâtiments. <http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/rapportdexpertise-haiti.pdf>. Accessed 02 Dec 2018.

49. Dif, H. Zendagui, D. & Aissa Mamoune, S.M. (2011). Impact de l'effet de site dans l'estimation du risque sismique cas de la ville de Djelfa (Algérie). XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.
50. D'Ayala, D. F., & Paganoni, S. (2011). Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(1), 81–104.
51. Di Lodovico, M., Digrosolo, A., Graziotti, F., Moroni, C., Belleri, A., Caprili, S., et al. (2017). The contribution of ReLUIs to the usability assessment of school buildings following the 2016 central Italy earthquake. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. <https://doi.org/10.4430/bgta0192>.
52. EERI. (2003). The Boumerdes, Algeria earthquake of May 21, 2003, Reconnaissance Report. Earthquake Engineering Research Institute. https://www.eeri.org/site/images/lfe/pdf/algeria_20030521.pdf. Accessed 02 Dec 2018.
53. Adams B.J., Eguchi R.T. (2008) Remote sensing for resilient multi-hazard disaster response, introduction to damage assessment methodologies. *Technical report*, MCEER-08-0020, Buffalo.
54. Elenas A. Vrochidou E. Alvanitopoulos, P. & Andreadis, I. (2013). In Computational Methods in Stochastic Dynamics (Netherlands: Springer) Classification of seismic damages in buildings using fuzzy logic procedures 335-344.
55. Furuta, H. Shirwshi, N. Umano, M. & Kawakamis, K. (1991). Knowledge-based expert system for damage assessment based on fuzzy reasoning. *Computers & Structures*, 40(1), 137-142.
56. Faust, B. (2002). Evaluation of the Residual Load-Bearing Capacity of Civil Structures Using Fuzzy-Logic and Decision Analysis. Unpublished PhD thesis, Universität Der Bundeswehr, Germany.
57. Flory-celini, C. & Virgone, J. (2008). Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant. Thèse, université Claude-Bernard. France.
58. Goupy, J. (1990). Étude comparative de divers plans d'expériences. *Revue de statistique appliquée*, 38(4), 5–44.
59. Goupy, J. (1996). Unconventional experimental designs theory and application. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 33, 3–16.
60. Grunthal G. et al. (1998). *European Macroseismic Scale 1998*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol 15, Luxembourg.
61. Goupy, J. (1999). *Plan d'expériences pour surface de réponse*. Dunod.
62. Goupy, J. (2000). Modélisation par les plans d'expériences. *Techniques de l'Ingénieur*, R275.
63. Gregor, S. (2001). Explanations from knowledge-based systems and cooperative problem solving: an empirical study. *International Journal of Human Computer Studies*, 54, 81-105.
64. Grünthal, G., & Levret, A. (2001). *European Macro seismic Scale 1998 (EMS-98)*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Luxembourg: Conseil de l'Europe.

65. Gorettiet A., & Pasquale G. D. (2004). Building inspection and damage data for the 2002 Molise, Italy. *Earthquake. Earthquake Spectra*, 20(S1), 167–190.
66. Goupy, J. & Creighton, L. (2006). Introduction aux plans d'expériences, 3^{ème} édition, DUNOD. ISBN 2-10049744-8.
67. Golabchi, M. (2008). A knowledge-based expert system for selection of appropriate structural systems for large spans. *Asian Journal of Civil Engineering*, 9(2), 179–191.
68. Guéguen P. (2009). Fausse idée reçue N°1 : il n'y a pas de séismes pouvant provoquer des victimes en France. Institut des sciences de la terre-Grenoble. <http://www.auvergne-rhone-alpes.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/effetsdesitepdf>
69. Guettiche A. (2017). Évaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville-cas de la ville de Constantine. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie.
70. Hopfield, J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79, 2554–2558.
71. Hisada, Y. Shibayama, A. & Ghayamghamian, M. R. (2004). Building damage and seismic intensity in Bam City from the 2003 Iran, Bam, Earthquake. *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 79, 81–93.
72. Hamizi M. Hannachi N.D. & Rassoul I. (2008). Conception et réalisation d'un système d'aide à l'évaluation de la vulnérabilité du bâti existant, Colloque National, 25 et 26 Novembre 2008, Constantine, Algérie.
73. Hiroto K., Seitaro T., & Tomohisa M. (2010). Preliminary Reconnaissance Report of the Chile Earthquake 2010. Building Research Institute, Japan.
74. Hamizi M. Bouzid L. & Hannachi N. E. (2010). Méthodologie de l'évaluation de la fonction de vulnérabilité et du risque sismique pour les structures en poteaux poutres. Etude de cas : Wilaya de Boumerdès Algérie.
75. Liu H., Koyama C., Zhu J., Liu Q., Sato M. (2016). Post-Earthquake Damage Inspection of Wood-Frame Buildings by a Polarimetric GB-SAR System. *Remote Sensing Journal*. <https://doi.org/10.3390/rs8110935>
76. Jackson P. (1998). Introduction to expert systems: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
77. JBDPA: the Japan Building Disaster Prevention Association. (2001). Standard for seismic evaluation of existing reinforced concrete buildings, Japan.
78. Koshal R.S. (1933). Application of the method of maximum likelihood to the improvement of curves fitted by the method of moments. *J R Stat Soc Ser A*, 96, 303–313.
79. Khaetzel, L.J. & Clifton, J.R. (1995). Expert/Knowledge Based Systems for Materials in the Construction Industry: State-of-the-Art Report. *Materials and Structures*, 28, 160-174.
80. Khare, M., & Shiva, N. (2007). Artificial Neural Network in vehicular pollution modeling. *In Studies in computational intelligence*, 41, 1–6..
81. Kendal, S. L., & Creen, M. (2007). *An introduction to knowledge engineering*. London: Springer.

82. Khan, A. R., Rehman, Z. U., & Amin, H. U. (2011). Knowledge-Based system's modeling for software process model selection. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2(2), 20-25.
83. Kezmane A. Hamizi M. & Boukais S. (2014). Semi Empirical Equation for Peak Shears Strength of Rectangular Reinforced Concrete Walls with Aspect Ratio Less or Equal to One. *Applied Mechanics and Materials*. 578, 974-978.
84. Kaid-ameur, D. & Hebbar, A. (2015). stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application À la tenue À l'usure des aciers hydrogènes, 22^{ème} Congrès Français de Mécanique, Lyon, France(FR), AFM. <http://hdl.handle.net/2042/57334.pdf>.
85. Kahil A. Nekmouche A. Boukais S. & Hamizi M. (2017). Effect of RC wall on the development of plastic rotation in the beams of RC frame structures. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 12(1):1-13.
86. Meghraoui. M. (1991). Blind reverse faulting system associated with the Mont Chenoua-Tipaza earthquake of 29 October (north-central Algeria), *Terra Nova*, 3, 84-93.
87. Marinelli L., Michel R., & Beaudoin A. (1997). Flood mapping using ERS tandem coherence image: a case study in souther France. In third ERS Symposium on Space at the service of our environment, Florence, Italie, 17-21 march 1997. 531-536.
88. Montgomery, D. C. (1997). *Design and analysis of experiments*. New York: Wiley.
89. Merritt D. (2001). *Building Expert Systems in Prolog*. Edition 2001.
90. Maskri, B., Attar, A., Breysse, D., & Bourahla, N. (2009). Modélisation de la réponse sismique des structures par la méthode des plans d'expériences : cas des bâtiments de forme régulière. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 13(3), 329-346.
91. Meslem, A., Yamazaki, F., & Maruyama, Y. (2011). Accurate evaluation of building damage in the 2003 Boumerdes, Algeria earthquake from Quickbird satellite images. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 5(1). 1-18.
92. Mosa, A. M., Taha, M. R., Ismail, A., Atiq, R., & Rahmat, O. K. (2013). An Educational Knowledge-Based System for Civil Engineering Students in Cement Concrete Construction Problems. *Journal of Civil Engineering and Management*. 19(6), 846-861.
93. Maeda M. Matsukawa K. & Ito Y. (2014). Revision of guideline for post-earthquake damage evaluation of RC buildings in Japan. Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Anchorage.
94. Mansiya K. Alma Z. Mannapova T. Mussaif M. & Nigmatov K. (2014). The Methodology of Expert Systems. *International Journal of Computer Science and Network Security "IJCSNS"*, 14(2).
95. Mehrbakhsh N., Rozana Z., Othman I., Muhd Z., Rosli M., Waseem C., Zainal A., Shaza R. S., & Dodo A. Y. (2015). A knowledge-based expert system for assessing the performance level of green buildings. *Knowledge-Based Systems*, 86, 194-209.

96. Nekmouche A. Hamizi M. Khelil N. & Kezman A. (2017). Simplified models to control plastic hinges in reinforced concrete frame structures. *Asian Journal of Civil Engineering*. 19(105). DOI: 10.1007/s42107-017-0002-3
97. Noura, H., Mebarki, A., & Abed, M. (2017): Post-quake structural damage evaluation by neural networks: theory and calibration. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, DOI: 10.1080/19648189.2017.1304277.
98. Ouyed, M. et al. (1981). Seismo tectonics of the El Asnam earthquake, *Nature* 292, 26-31.
99. Ousalem H. & Bechtoula H. (2003). Report on the Damage Investigation and Post-Seismic Campaign of the 2003 Zemmouri Earthquake in Algeria. Earthquake Research Institute, University of Tokyo.
100. OFPP : Office Fédérale de la Protection de la Population. (2004). Rapport d'experts: tremblement de terre et biens culturels. Zurich.
101. Okada S. & Takai N. (2009). Classifications of structural types and damage patterns of buildings for earthquake field investigation. <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0705.pdf>
102. Olson, D. L., & Dash Wu D. (2010). Earthquakes and Risk Management in China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 16(3), 478-493.
103. OFPP : Office fédéral de la protection de la population, Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI) et Association Suisse d'Assurances (ASA). (2010). Manuel pour l'évaluation des bâtiments après un tremblement de terre. https://www.vkg.ch/media/1229/handbuch_gebaeudebeurteilung_f.pdf. Accessed 03 Dec 2018.
104. OFPP : Office Fédérale de la Protection de la Population. (2018). Guide pour l'évaluation post-sismique des bâtiments. <https://www.google.com/search?q=ofpp+Guide+pour+l%E2%80%99C3%A9valuation+postsismique+des+b%C3%A2timent&ie=utf-8&oe=utf8&client=firefox-b>. Accessed 03 June 2018.
105. Plackett, R.L. & Burman J.P. (1946). *Design of Optimum Multi factorial Experiments*. *Biometrika*, 33, 305-325.
106. Pillet, M. (1994 ou 97). Les plans d'expériences par la méthode Taguchi, Les Editions d'organisation, Paris.
107. Perrone D, Aelterman J, Pižurica A, Jeurissen B, Philips W, & Leemans A. (2015). The effect of Gibbs ringing artifacts on measures derived from diffusion MRI. *Neuroimage*, 120, 441-455.
108. Mærsk-Møller, H. M., & Jørgensen, B. N. (2011). An Evaluation of the NetBeans Module System as a Productline Implementation Technology. In Proceedings of the 2nd International Conference on Measurement and Control Engineering (ICMCE 2011). *American Society of Mechanical Engineers*. 341-348.
109. Rechtschaffner R. L. (1967). «Saturated Fractions of 2n and 3 Factorial Designs». *Technometrics*, 9. 569-575.
110. Rizzo, T. & Machanic, A. (2005). Pro SQL Server. Edition A Press
111. Rathje, E. Chang, W.J. & Stokoe, K.H. (2005). Development of an in situ dynamic liquefaction test. *Geotechnical Testing Journal*. 28(1), 50-60.

112. Rathje, E. M. & Adams, B. J. (2008). The Role of Remote Sensing in Earthquake Science and Engineering: Opportunities and Challenges. *Earthquake Spectra*, 24(2), 471–492.
113. Raza F. N. (2009). Artificial Intelligence Techniques in Software Engineering (AITSE), IMECS 2009, 1, Hong Kong.
114. Schimmerling, P. Sisson, J. C. & Zaidi, A. (1998). pratique des plans d'expériences. *Tec & Doc Lavoisier*, France.
115. Soutou C. (2002). De UML à SQL- La conception de base de données. Eyrolles edition.
116. Saito, K. Spence, R. Going, C. & Markus, M. (2004). Using high-resolution satellite images for post-earthquake building damage assessment: A study following the 26 January 2001 Gujarat earthquake, *Earthquake Spectra* 20(1), 145–169.
117. Srinivasaiah H.C. & Bhat, N. (2004). *Characterization of sub-100nm CMOS Process using screening experiment technique*”, Proceedings 17th International Conference on VLSI Design, pages 285 -290, Mumbai, India.
118. Schweier, C. & Markus, M. (2005). Casualty scenarios based on laser scanning data. *Proceedings of the 250th Anniversary of 1755 Lisbon Earthquake*, 1–4 November, Lisbon, Portugal.
119. Saito, K., Spence, R. & Foley, T. (2005), Visual damage assessment using high-resolution satellite images following the 2003, Iran, earthquake. *Earthquake Spectra*, 21(S1), S309–S318.
120. Sextos AG. Kappos A. & Stylianidis K. (2008). Computer-aided pre-and post-earthquake as-sessment of buildings involving database compilation, GIS visualization, and mobile data transmission. *Comput-Aided Civil Infrastructures Eng*, 23, 59–73.
121. Sajja, P. S. & Akerkar, R. (2010). Knowledge-based systems for development. *Advanced Knowledge Based Systems: Model, Applications & Research*, 1, 1–11.
122. Shen, W. Hao, Q. Mak, H. Neelamkavil, J. Xie, H. et al. (2010). Systems integration and collaboration in architecture, engineering, construction, and facilities management: A review. *Advanced Engineering Informatics*, 24(2), 196–207.
123. Sinha, R. & Shiradhonkar, S.R. (2012). Detailed evaluation of avialable seismic damage indices. Iset
124. Shao, Y. W. Wu, Y. S. Kao, S. F. Huang, C. J. & Chang, K. Y. (2014). Application of fuzzy theory on earthquake damage rate estimation of buildings. *Journal of Central South University*, 21, 2454–2459.
125. Taguchi G, & Konishi S. (1987). Taguchi Methods Orthogonal Arrays and Linear Graphs: Tools for Quality Engineering. American Supplier Institute, Dearborn, Michigan.
126. Telforda, J. K. (2007). Brief introduction to design of experiments. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 27(3), 224–232.
127. Taskin B., Sezen A., Mert Tugsal U., & Erken A. (2012). The aftermath of 2011 Van earthquakes: evaluation of strong motion, geotechnical and structural issues. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 11(1). 285-312.

128. Tebbiche, H., & Boutoudj, M. S. (2014). Optimized vortex generators in the flow separation control around a NACA 0015 profile, Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2014, Porto, Portugal. 3219-3226.
129. Taillandier, F., Mora, L., & Denys, B. (2016). Decision support to choose renovation actions in order to reduce house energy consumption—an applied approach. *Building and Environment*, 109, 121–134.
130. Tintu Mary C. & Sankar, N. (2016). Knowledge Based Expert System for the Selection of Retaining Walls. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(4), 405-418.
131. Usta, P. Nihat, M. EVCİ, A. & ERGÜN, S. (2018). Assessment of Seismic Damage on the Exist Buildings Using Fuzzy Logic. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 430. DOI: 10.1088/1757-899X/300/1/012062.
132. Voyer R. (1992). Moteur des systèmes experts. Eyrolles Edition.
133. Vial J., & Jardy A. (1998). Utilisation des plans d'expériences pour évaluer la robustesse d'une méthode d'analyse quantitative par Chromatographie en Phase Liquide. *Analisis*, 26, 15-24.
134. Vincens E, & Labbe P. (2002). Tassements et pouvoir endommageant d'un mouvement sismique. *Revue française de génie civil*, 6(2), 197-226.
135. Vivier, S., Vauquelin, A., & Vilain, J.P. (2007). configuration d'une structure « HALBATCH » par plans d'expériences treillis. Conférence EF 2007 ENSEIHT, Toulouse, France.
136. Van den Brakel, J. (2010). Design-based analysis of factorial designs embedded in probability samples. Statistics Netherlands, Heerlen.
137. Van den brakel, J. (2013). Analyse fondée sur le plan de sondage de plans d'expérience factoriels intégrés dans des échantillons probabilistes. Maastricht University School of Business and Economics, Maastricht, Pays-Bas. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/12-001-x/2013002/article/11870-fra.htm>.
138. Wood, E. M. (2002). The Question of Market Dependence. *Journal of Agrarian Change*, 2(1), 50-87. <https://doi.org/10.1111/1471-0366.00024>
139. Wielemaker J. (2006). SWI-Prolog 5.6. Reference manual. <http://www.swi-prolog.org>
140. Tinsson, W. (2010). Plans d'exp'erie: constructions et analyses statistiques, Mathématiques et Applications, 67, Doi 10.1007/978-3-642-11472-43.
141. Yelles-Chaouche, A.K. (2001). Recent Seismic Activity in Algeria, Workshop on the Geodynamics of the Western Part of the Eurasia-Africa Plate Boundary (Azores-Tunisia) San Fernando (Cadiz, Spain), 31 May – 2 June.
142. Yelles-Chaouche, A.K., Djellit, H., Beldjoudi, H., Bezzeghoud, M. & Buform, E., (2004). The Ain Temouchent (Algeria) earthquake of December 22nd, 1999, *Pure appl. Geophys*, 161, 607-621.
143. Yamazaki, F., Kouchi, K., Matsuoka, M., Kohiyama, M., & Muraoka, N. (2004). Damage detection from high-resolution satellite images for the 2003 Boumerdes, Algeria Earthquake, Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM.

144. Yamazaki D. Kurisu S. & Takenawa T. (2005). Regulation of cancer cell motility through actin reorganization. 96(7), 379-86.
145. Yamazaki, F. & Matsuoka, M. (2007). Remote sensing technologies in post-disaster damage assessment. *J. Earthquake Tsunami*, 1(3), 193–210.
146. Yousif, A., Mansoor, Z., & Qiang, Z. (2012). Using the knowledge-based system (KBS) to improving system for crack diagnosis in r.c column. *Asian Journal of Natural & Applied Sciences*, 1(3), 18–25.
147. Zadeh, L.A. (1999). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 100, 9-34.
148. Zadeh L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-354.

Résumé

L'évaluation rapide et rigoureuse des dommages subis par un ouvrage après un tremblement de terre est une tâche très importante, surtout que l'utilisation des maisons immédiatement après séisme est un fait très fréquent chez les habitants. En se basant sur l'expérience locale (Algérie) faisant suite à différents tremblements de terre successifs, on constate que le nombre d'experts (habilités à effectuer une évaluation de l'état d'un ouvrage) est très insuffisant. Cette situation oblige souvent les pouvoirs publics à faire appel à un personnel n'ayant pas toute la maîtrise de ce processus d'évaluation. À cet effet, et dans un souci de rigueur et d'efficacité, les initiatives se multiplient en Algérie visant la réalisation d'outils sophistiqués et rapides, d'évaluation de l'état des ouvrages après séisme.

Dans cette optique, le travail de recherche effectué consiste en l'élaboration d'un système expert multifonctionnel *EDPS* (Évaluation de Dommages Post-Sismique). Un outil puissant permettant l'évaluation, le traitement et l'archivage du stock de données collectées après tremblement de terre.

On peut noter que cet outil *EDPS* peut être exploité par deux types d'utilisation :

- L'utilisateur ordinaire (le propriétaire ou l'expert), pour l'inspection visuelle des dommages (suivant deux démarches distinctes).
- L'utilisateur administrateur, pour l'actualisation de la base de connaissances et/ou pour l'ajout ou la suppression d'utilisateur de type expert.

L'outil *EDPS* est essentiellement organisé en quatre modules : Interface, aide, explication et acquisition de connaissances.

La connaissance, élément prépondérant dans le système à base de connaissances, se partage en faits et règles.

Parmi ces dernières, on distingue celles dites d'inférences, et d'autres heuristiques données sous formes de modèles mathématiques et de conditions, respectivement.

Parmi les modèles mathématiques nécessaires dans la base de règle, trois sont développés et y sont introduits. Ils permettent d'estimer le niveau de dommage (local et global) c.-à-d. d'estimer l'importance des dégâts occasionnés à l'ensemble des composants structurels, non-structurels et de toute la structure. Lors de l'élaboration de ces modèles, un traitement statistique est appliqué sur une banque de données acquise de l'enquête effectuée après le séisme de Boumerdes en 2003. L'analyse est menée suivant les principes de la théorie des plans d'expériences.

Concernant la base de fait, sa mise en place a été effectuée selon les informations données ci-après :

- Celles issues des rapports d'enquêtes et des articles scientifiques sur l'évaluation des dommages post-sismiques,
- Celles acquises par le biais de retour d'expériences, par questionnaires d'expert/d'ingénieurs,

Enfin, la validation de l'outil et de ses performances est effectuée à travers un test d'évaluation réalisé avec *EDPS* et mené via l'interface expert et propriétaire.

Mots clés : Gestion de crise, Évaluation de dommages, bâti Algérien, Post-sismique, méthode des plans d'expérience, Système Expert.

Abstract

The rapid and rigorous assessment of damage to a structure after an earthquake is a very important task, especially that the use of houses immediately after earthquake is a fact very common among residents. Based on the local experience (Algeria) following successive earthquakes, the number of experts (who are able to carry out an assessment of the condition of a structure) is very inadequate. This situation often forces the public authorities to call on staff who are not fully familiar with this evaluation process. To this end, and for the sake of rigor and efficiency, initiatives are multiplying in Algeria aiming at the realization of sophisticated and fast tools, assessment of the state of constructions after earthquake.

In this context, the research work carried out consists of the development of a multifunctional expert system *EDPS* (Évaluation de Dommages Post-Sismique). A powerful tool for evaluating, processing and archiving the stock of data collected after the earthquake.

It can be noted that this *EDPS* tool can be exploited by two types of use:

- The ordinary user (owner or expert), for visual inspection of damage (following two separate approaches).
- The administrator user, for updating the knowledge base and / or for adding or removing an expert user.

The *EDPS* tool is essentially organized in four modules: Interface, help, explanation and knowledge acquisition. Knowledge, a preponderant element in the knowledge-based system, is divided into facts and rules.

Among the latter, we distinguish those called inferences, and other heuristics given in the form of mathematical models and conditions, respectively.

Of the mathematical models needed in the rule base, three are developed and introduced. They allow to estimate the level of damage (local and global) i.e. to estimate the damage level to all structural, non-structural and structural components. During the development of these models, a statistical treatment is applied to a data bank acquired from the survey carried out after the Boumerdes earthquake in 2003. The analysis is conducted according to the principles of the theory of experimental design.

Regarding the fact base, its implementation was carried out according to the information given below:

- Those from survey reports and scientific articles on the evaluation of post-seismic damage,
- Those acquired through experience feedback, expert questionnaires / engineers,

Finally, the validation of the tool and its performance is carried out through an evaluation test carried out with *EDPS* and conducted via the expert and proprietary interface.

Key-words: Crisis management, Assessment damage, Algeria builds, Post-earthquake, Experimental of design, Expert system.