

32 - 620 - 31 - 2



République Algérienne Démocratique & Populaire
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

UNIVERSITE SAAD DAHLEB

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE-CIVIL

MEMOIRE

Présenté par: M. MOUSSA

En vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

Option

CONSTRUCTION - INDUSTRIELLE

Thème

**APPLICATION D'UN SYSTEME EXPERT
A L'ESTIMATION DES DOMMAGES
D'ELEMENTS DE STRUCTURE
EN BETON ARME**

Soutenu le Davant le Jury composé de:

- D^r KENAI** Maitre de conférence.(Univ.Blida)..... Président
- D^r BOURAHLA** Maitre de conférence.(Univ.Blida)..... Examineur
- D^r ABED** Maitre de conférence.(Univ.Blida)..... Examineur
- D^r SILHADI** Maitre de conférence.(ENP)..... Examineur
- D^r NOUAS** Chargé de cours.(Univ.Blida)..... Rapporteur

UNIVERSITE SAAD DAHLEB
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE-CIVIL

MEMOIRE DE MAGISTER

Thème

APPLICATION D'UN SYSTEME EXPERT
A L'ESTIMATION DES DOMMAGES
D'ELEMENTS DE STRUCTURE
EN BETON ARME

Dérogé par: Z. NOUAS

Présenté par: M. MOUSSA

REMERCIEMENTS

J'adresse en premier lieu mes remerciements au D^r NOUAS pour m'avoir encadrée dans mon travail et prodigué les conseils les plus utiles.

Je remercie D^r KENAI de m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.

Mes remerciements vont également au D^r BOURAHLA, D^r ABED et D^r SILHADI pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury.

Je remercie messieurs MOKADEM et OUSSAID de m'avoir accueilli au sein de leur équipe de CTC Sud (Blida), je leur suis très reconnaissante pour l'aide qu'ils m'ont apportée.

Je remercie messieurs NAILI et MEHENI du CGS pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail.

Ma reconnaissance va à Madame ALIANE du Cerist qui n'a ménagé aucun effort pour m'apporter un soutien informatique appréciable.

Je remercie monsieur MOUSSA. J pour sa contribution, ses encouragements et ses conseils.

Enfin je remercie les membres de ma famille de leur aide, leur soutien et leur compréhension.

RESUME

L'estimation des dommages post-sismiques d'éléments de structure en béton armé est un problème complexe qui repose principalement sur l'expertise humaine. Dans le cas de catastrophe naturelle, comme c'est le cas pour le séisme, et face à l'ampleur des dégâts, il arrive souvent qu'il n'y est pas suffisamment de personnes qualifiées pour couvrir les inspections des constructions endommagées en un temps relativement court. Il s'agit pour ces ingénieurs chargés de l'expertise, de classer les constructions en fonction de la sévérité des dégâts enregistrés, de prendre les mesures d'urgence en terme, d'étalement d'éléments de structure en vue de réparations et/ou de renforcement éventuels, ou même de démolition le cas échéant. De cette expertise post-sismique découle des prises de décision lourde de conséquences concernant l'orientation des secours, l'évacuation des occupants, le relogement des populations. Dans le cadre de ce travail, un système expert pour l'évaluation des dommages post sismiques d'éléments de structure en béton armé a été développé, c'est un système d'aide à la décision qui permet d'assister l'ingénieur dans sa tâche d'estimation du degré d'endommagement d'éléments poutres et poteaux en béton armé. Le système EDES, acronyme de Estimation des Dommages d'Eléments de Structures en béton armé, permet d'analyser et de déterminer qualitativement des modes de rupture probables des éléments de structure en béton armé limités aux poutres et poteaux, d'attribuer qualitativement un degré d'endommagement de l'élément de structure en utilisant une échelle d'indices qui représente le degré de sévérité de chaque type de dommage (fissure, épaufrure, écrasement, déformation, corrosion des armatures) pouvant être développé sur l'élément., de déterminer si un élément doit être réhabilité moyennant des méthodes de renforcement et /ou réparation pour une utilisation future et d'expliquer « pourquoi » une information est nécessaire et « comment » une conclusion est déduite.

ملخص

إن التقييم أضرار عناصر هياكل الإسمنت المسلح الناتج عن الزلازل هي مسألة عويصة و معقدة تركز أساسا على عملية فحص خبير. وفي حالات الكوارث الطبيعية و خاصة الزلازل و في هذا الصدد نظرا للأضرار الضخمة الناتجة عنها عادة لا يوجد عدد التقنيين الأكفا لتغطية كل التفتيشات للمباني المضررة في مدة قصيرة من الزمن و يقتضي على هؤلاء الخبراء أو التقنيين ترتيب المباني حسب درجة الضرر المسجل و أخذ التدابير الإستعجالية قصد تحصين أو تركيز عناصر الهياكل و هذا لتصلحها (لترميمها) أو تدعيمها و إذا اقتضاء الضرورة تدميرها. و من خلال المراقبة التقنية للبنىات من طرف الخبير المعماري يمكن أخذ القرارات الهامة بالنسبة لتوجيه النجدة و إعادة التسكين للأشخاص. استهدف هذا العمل في وضع نظام معلوماتي خبير لتقييم الأضرار لعناصر هياكل الإسمنت المسلح الناتجة عن عوامل الزلازل. هذا النظام يستعمل كمساند و مساعد للخبير في أخذ قراراته المتعلقة بعناصر الهياكل (عمود و عريضة).

النظام المقترح يحمل اسم EDES يمكن من تحليل و تحديد نوعي لطرق و نوع التخطم و الكسر المحتمل لهذه العناصر الهيكلية و يمكن كذلك إعطاء درجة الضرر باستعمال سلم تقويمي لدرجة الضرر و هذا حسب نوعية سبب التخطم (التشقق، القشر، التمزق، التشويه، تصديد العناصر الحديدية) و تمكن كذلك من إعطاء طرق الترميم أو التركيز لاستعمال مستقبلي و أيضا يوضح لماذا معلومة ما هي أساسية و كيفية استنتاج الخلاصة

ABSTRACT

The damage assessment of structural reinforced concrete elements after an earthquake is a complex problem which is based mainly on the human expertise. In the case of natural disaster, as it is the case for the earthquake, and in front of the extent of damages, it often happens that there is not enough persons qualified to cover the inspections of constructions damaged at relatively short time. It is a question for these engineers with the expertise, to classify constructions according to the severity of damages, to take urgent measures in terms of shoring, repairs and/or strengthening, or even of demolition of structural elements of construction. After the earthquake expertise, decision-makings ensue which lead to consequences concerning the orientation of the helps, the evacuation of the occupants, the rehousing of the population. Within the framework of this work, an expert system for damage evaluation of structural reinforced concrete elements was developed, it allows to assist the engineer in its task of damage estimation of degrees of beams and columns. EDES system, acronym of Estimation of the Damages of Elements of Structures, allows to analyze and to determine qualitatively likely modes of failure of structural elements limited to beams and columns, to attribute qualitatively a degree of damage of structural element by using a scale of index which represents the degree of severity of every type of damage (cracking, spalling, crushing, deformation, corrosion of rebar) being able to be developed on the element. To determine if an element must be rehabilitated or repaired for a future use and to explain "why" an information is necessary and "how" a conclusion is deducted.

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1

INTRODUCTION.....	1
1-1 Sélection du problème et justification du développement d'un système expert.....	2
1-2 Plan de travail.....	4

Chapitre 2

ESTIMATION DES DOMMAGES POST-SISMIQUES ET PROCEDURES DE REHABILITATION

2-1 Estimation des dommages post-sismiques.....	6
2-1.1 Démarche de l'expertise.....	7
2-1.2 Problématique d'estimation des dégâts.....	8
2-1.3 Résultats des interviews accordées par les experts du domaine.....	9
2-2 Références bibliographiques.....	11
2-3 Méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages et mesures d'urgence.....	14
2-3.1 Mesures urgentes-étaieiment	14
2-3.2 Méthodes de réparation et de renforcement.....	19

Chapitre 3

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EXPERTS

3-1 Intelligence artificielle et systèmes experts	31
3-1-1 Intelligence artificielle : définition et caractéristiques.....	31
3-1-2 Systèmes experts ou systèmes à base de connaissance.....	34
3-2 Architecture générale d'un système expert.....	37
3-3 Caractéristiques des systèmes experts.....	39
3-4 Processus de développement d'un système expert.....	40
3-5 Les principaux modes de représentation de la connaissance.....	43
3-5.1 Logique des propositions	43
3-5.2 Calcul des prédicats	44
3-5.3 Les règles de production	44
3-5.4 Représentation par objets	52
3-5.5 Réseaux sémantiques.....	55
3-6 Systèmes experts dans le domaine du Génie civil.....	56

3-7	Systèmes experts développés dans le domaine de l'estimation des dommages.....	58
3-8	Conclusion.....	62

Chapitre 4

APPROCHE : EDES EXPERT

4-1	Présentation sommaire de EDES : Expert.....	63
4-2	Consultation de EDES	65
4-3	Approche d'évaluation des dommages.....	74
4-3.1	La méthode analytique de hiérarchisation (AHP).....	75
4-3.2	Implémentation de la méthode analytique de hiérarchisation	78
4-4	Evaluation des dommages par fissuration.....	80
4-5	Evaluation des dommages par épaufrure.....	86
4-6	Evaluation des dommages par écrasement.....	90
4-7	Estimation des conditions d'armature.....	90
4-8	Estimation de l'endommagement par déformation	91
4-9	Evaluation de l'endommagement total d'un élément de structure	92
4-10	Estimation de l'endommagement global du niveau.....	96

Chapitre 5

IMPLEMENTATION

5-1	Représentation de la connaissance	101
-----	---	-----

Chapitre 6

CONCLUSION & RECOMMANDATIONS	111
---	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	116
--	-----

ANNEXES

Annexe 1	Base des règles.....	118
Annexe 2	Base des faits.....	126
Annexe 3	Interface utilisateur.....	130
Annexe 4	Fiches techniques	136
Annexe 5	KAPPA-PC	140
Annexe 6	AHP <i>Analytical Hierarchy Process</i>	144

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1	Les deux parties d'une règle.....	45
Tableau 3-2	Quelques systèmes experts dans le domaine du génie civil.....	57
Tableau 4-1	Matrice de comparaison par paires de chaque facteur par rapport à l'influence qu'a chacun d'entre eux sur la fissuration.....	81
Tableau 4-2	Indice & Sévérité des dommages de largeur de fissure.....	82
Tableau 4-3	Indice & Sévérité des dommages de densité de fissure.....	83
Tableau 4-4	Facteur de priorité entre (Largeur / Densité) de fissure.....	84
Tableau 4-5	Facteur de priorité & Facteur de pondération	85
Tableau 4-6	Indice & Sévérité des dommages de fissuration.....	85
Tableau 4-7	Indice des dommages d'apparence Epaufrure	87
Tableau 4-8	Indice & Sévérité des dommages de l'Etendue d'Epaufrure.....	87
Tableau 4-9	Facteur de priorité entre (Apparence/Etendue) d'Epaufrure.....	88
Tableau 4-10	Facteur de priorité & Facteur de pondération	89
Tableau 4-11	Indice & Sévérité des dommages d'épaufrure.....	89
Tableau 4-12	Indice & Sévérité des dommages d'écrasement.....	90
Tableau 4-13	Indice & Sévérité des dommages des conditions d'armatures.....	91
Tableau 4-14	Indice & Apparence des dommages du Fléchissement de la poutre.....	92
Tableau 4-15	Indice & Apparence des dommages par Flambement de poteau...	92

Tableau 4-16	Facteur de priorité des différents types de dommage observés sur un élément poutre.....	94
Tableau 4-17	Facteur de priorité des différents types de dommage observés sur un élément poteau.....	94
Tableau 4-18	Facteur de priorité dans les 3 cas suivant	95
Tableau 4-19	Indice total calculer selon la formule 4 et la sévérité associée.....	96
Tableau 4-20	Indice & Proportion de sévérité par niveau	98
Tableau 4-21	Indice global par niveau (ensemble de poteaux)..	99
Tableau 5-1	Exemple de la base objet.....	102

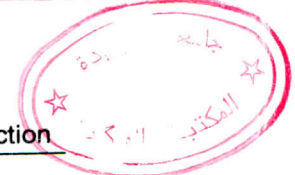
LISTE DES FIGURES

Fig. 2-1	Poteau à remplacer ou à réparer (<i>Etayage sur un niveau</i>).....	15
Fig. 2-2	Poteau à remplacer ou à réparer (<i>Etayage sur tous les niveaux</i>).....	15
Fig. 2-3	Etai type industriel et échafaudage.....	16
Fig. 2-4	Etai en bois	16
Fig. 2-5	Etayage par profilés métalliques	17
Fig. 2-6	Soutènement latéral	18
Fig. 2-7	Etayage par diagonales	18
Fig. 2-8	Gainage métallique.....	22
Fig. 2-9	Gainage métallique avec augmentation de la section de béton..	22
Fig. 2-10	Gainage en béton armé.....	24
Fig. 2-11	Bétonnage.....	25
Fig. 2-12	Gainage en béton armé.....	26
Fig. 2-13	Restitution de la capacité portante de la poutre.....	28
Fig. 3-1	Branche de l'informatique.....	34
Fig. 3-2	Architecture général d'un système expert.....	37
Fig. 3-3	Processus de développement d'un système expert.....	42
Fig. 3-4	Chaînage des règles.....	47
Fig. 3-5	Organigramme chaînage avant	48
Fig. 3-6	Organigramme chaînage arrière.....	49
Fig. 3-7	Diagramme des classes et instances.....	53

Fig. 3-8	Graphe d'héritage.....	55
Fig. 3-9	Réseaux sémantiques.....	55
Fig. 4-1	Organigramme général EDES : Expert.....	64
Fig. 4-2	Organigramme d'estimation des dommages d'un élément de structure.....	69
Fig. 4-3	Organigramme Procédure d'urgence et Réparation-Renforcement.....	72
Fig. 4-4	Organigramme d'estimation globale Niveau.....	74
Fig. 4-5	Niveau d'hierarchie de EDES Expert.....	80
Fig. 5-1	Arbre objets.....	101
Fig. 5-2	Rapport final.....	104

Chapitre 1

INTRODUCTION



INTRODUCTION

Après un séisme, l'inspection des dommages occasionnés à une structure est d'une grande importance afin de déterminer les actions urgentes à entreprendre et celles à long terme, pour réduire le risque d'effondrement des structures ou immeubles encore « debout » et qui auraient un grand besoin d'être confortés.

La première action, c'est de procéder à une inspection selon une méthodologie qui fournirait de manière rapide et fiable des informations exactes et précises concernant l'état ou la description des désordres ou endommagements des structures et un critère permettant de juger du niveau de l'endommagement.

Dans le cas de catastrophe naturelle comme cela a été le cas pour le séisme de Ain Temouchent, l'ampleur des dégâts a fait qu'il n'y avait pas assez de personnes qualifiées (ingénieurs en génie civil, et génie sismique) pour couvrir les inspections en un temps relativement court. En effet pour ce séisme survenu le 22-12-1999 à 18H36 un rapport consistant en une évaluation sommaire des dommages a été remis aux maîtres d'ouvrages potentiels pour l'adoption des premières mesures d'urgence en relation avec le bâti 8 jours à peine après le séisme.

L'expertise humaine est un facteur primordial dans le diagnostic des constructions et la prise de décision quant aux méthodes de renforcement ou réparations à entreprendre suite à un séisme.

De plus des personnes différentes peuvent interpréter des données d'inspections visuelles et émettre des jugements techniques différents, selon leur connaissance du sujet, découlant de leur formation ou de leur expérience.

C'est pourquoi le développement d'une approche systématique qui fournirait des conclusions rationnelles en simulant le jugement d'un expert serait des plus favorables dans ce type de situation.

1-1 Sélection du problème et justification du développement d'un système expert.

Aujourd'hui, il est établi que tout le nord du pays est concerné par l'aléa sismique à des degrés plus ou moins élevés et malheureusement les actions post-sismiques restent insuffisamment préparées et sont menées parfois d'une manière incohérente.

Dans ce genre de situation d'urgence, et face à l'ampleur des dégâts, il arrive souvent que les experts, ayant capitalisé une expérience dans le domaine de l'évaluation des dommages pour avoir participé dans le passé à des campagnes post-sismiques, ne soient pas toujours disponibles ou soient en nombre insuffisant.

De plus le sentiment de fatigue, le stress, l'émotion qu'entraîne ce type de situation douloureuse affectent les capacités d'objectivité de l'ingénieur chargé de l'expertise, à qui on incombe la lourde tâche de fournir de manière rapide, précise et fiable une estimation des dégâts et de prendre les décisions adéquates concernant l'évacuation ou non des occupants des constructions endommagées à des niveaux différents de sévérité.

Il s'agit pour ces ingénieurs d'agir vite et bien pour permettre à travers une classification des constructions endommagées, d'orienter les secours en matière notamment de relogement des populations.

Face à ce type de problème apparaît la notion d'utilisation de systèmes d'aide à la décision qui auraient pour fonction d'assister l'ingénieur dans sa tâche. De tels systèmes informatiques permettraient aux ingénieurs qui ne sont pas suffisamment expérimentés de trouver dans ces systèmes des guides et des aides pour juger de la sévérité de l'endommagement d'éléments de structures tels que poutres et poteaux ou de juger de la gravité de l'endommagement de la structure toute entière avec une idée sur ce qu'il convient de faire ou de ne pas faire face au double problème qu'est le

diagnostic des dégâts post-sismiques et les recommandations concernant les mesures d'urgences, la réparation et le renforcement de ces structures dans le but primordial de leur procurer une sécurité et protéger les vies humaines.

Ces systèmes informatiques ne sont autre que les systèmes experts. Ils permettent de simuler le raisonnement humain, ils fournissent une approche systématique du problème en donnant des conclusions rationnelles. Ces systèmes experts servent à transmettre une expertise, ils déchargent en même temps l'expert humain des expertises simples et répétitives et lui permettent de concentrer sa science sur des problèmes inédits et complexes.

C'est dans cette optique qu'un système expert a été élaboré pour l'estimation de l'endommagement d'éléments de structure en béton armé.

La problématique se définit par l'utilisation d'une approche pratique, informatisée et rationnelle capable de recueillir la connaissance, et le savoir faire des ingénieurs experts dans le domaine de l'évaluation, de la formaliser moyennant des règles ou des heuristiques qui grâce à un enchaînement adéquat seraient apte à reproduire le raisonnement même des experts humains, de déduire des conclusions et de fournir des recommandations concernant les structures endommagées.

Notre projet s'inspire de la méthode de travail adoptée par les ingénieurs du C.TC et du C.G.S lors de l'évaluation des dommages post-sismiques des ouvrages moyennant la fiche d'évaluation (voir annexe 4). La manière d'estimer les niveaux des dommages par une classification allant de 1 à 5 (pas de dommage jusqu'à démolition) a constitué le point de départ de notre système expert EDES : expert (*acronyme de Estimation de Dommage d'Elément de Structure*) .

Il est proposé dans le cadre de ce travail de développer un système expert qui assisterait les ingénieurs n'ayant pas une expérience dans le domaine de l'évaluation des dommages post sismiques d'éléments de structures en béton armé.

Le système EDES, acronyme de Estimation des Dommages d'Eléments de Structures en béton armé, permet :

- a) D'analyser et de déterminer qualitativement des modes de rupture possibles des éléments de structure en béton armé limités aux poutres et poteaux,
- b) D'attribuer qualitativement un degré d'endommagement de l'élément de structure en utilisant une échelle d'indices qui représente le degré de sévérité de chaque type de dommage (fissure, épaufrure, écrasement, déformation, corrosion des armatures) pouvant être développé sur l'élément.
- c) De déterminer si un élément doit être réhabilité moyennant des méthodes de renforcement et /ou réparation pour une utilisation future
- d) D'expliquer « pourquoi » une information est nécessaire et « comment » une conclusion est déduite.

1-2 Plan de travail

Notre mémoire s'organise autour de 6 chapitres. Après le chapitre consacré à l'introduction proprement dite, le chapitre 2 fournit les éléments nécessaires à la compréhension de la problématique de l'évaluation et du diagnostic post-sismique d'éléments de structures endommagés. Il met l'accent sur les difficultés rencontrées par les ingénieurs chargés de l'expertise et qui sont envoyés sur les lieux du sinistre, et introduit par conséquent l'idée d'utiliser un système expert qui aiderait les ingénieurs dans leur tâche. Dans ce chapitre les procédures de réhabilitation des ouvrages endommagés comprenant les techniques de renforcement, de réparations et des mesures d'urgence, sont décrites à travers des documents de référence mis au point par le Centre national de recherche appliquée en génie parasismique « CGS ». Ces outils documentaires ont servi de base pour l'élaboration des règles du système expert concernant la réparation, le renforcement des éléments de structure endommagés

Le chapitre 3 fournit une vue d'ensemble sur la technologie des systèmes experts et leurs applications au domaine du génie civil. Il met également l'accent sur des systèmes développés pour le problème de l'estimation des dommages .

Le chapitre 4 examine dans le détail l'approche de EDES : Expert développée dans l'estimation de l'endommagement d'éléments de structures poutre et poteau. le système fournit dans un premier temps, une évaluation des dégâts enregistrés à l'échelle d'un élément par le biais d'indices et de sévérité associée, puis dans un second temps , il propose des recommandations qui sont de l'ordre de la réparation et du renforcement.

L'implémentation de EDES dans KAPPA PC est discutée dans le chapitre5.

Le chapitre 6, finalise notre travail en offrant des conclusions et des recommandations futures qu'il serait intéressant d'apporter au système développé.

Des annexes de 1 à 6 sont fournies, elles concernent la base de règles, la base objet, les interfaces utilisateur (ou masques de saisie), une fiche d'évaluation technique des dommages post-sismiques, une brève description du Shell KAPPA-PC et un aperçu sur la méthode AHP.

Chapitre 2

**ESTIMATION DES DOMMAGES
POST-SISMIQUE
ET PROCEDURES DE REHABILITATION**

Dans ce chapitre, on se propose de décrire la démarche suivie par les ingénieurs en génie civil face au problème de l'estimation des dommages post-sismiques. Nous ferons référence dans ce qui suit à la démarche suivie par les ingénieurs Algériens notamment ceux du CTC (contrôle technique des constructions) et ceux du CGS (centre du génie sismique) lors du processus d'évaluation et d'expertise des constructions à la suite d'un séisme. Nous verrons également certaines approches utilisées au Japon, en Amérique, Turquie et Ex Yougoslavie à travers une littérature présentée sous forme de rapport de séminaires et d'articles. Une description détaillée des méthodes d'urgence (étayage) ainsi que des techniques de renforcement et de réparation sera également fournie.

2-1 Estimation des dommages post sismiques

L'estimation des dégâts occasionnés à une structure à la suite d'un séisme est une opération très délicate qui nécessite normalement la participation d'experts chevronnés qui ont déjà par le passé participé à des campagnes post-sismiques.

En Algérie, un nombre important de séismes sont survenus surtout durant ces vingt dernières années tels que les séismes dévastateurs de Chlef, Oran, Mascara et plus récemment les séismes modérés de Beni Chougrane, Ain Benian de Tipaza, et de Ain Temouchent .

A titre d'exemple on s'est intéressé au séisme de Ain Temouchent, pour lequel des enquêtes approfondies ont été menées dans le cadre de l'expertise liée à l'évaluation des niveaux de dommages, aux recommandations et au mode de renforcement et de réparation des ouvrages. La démarche suivie par les ingénieurs du CTC OUEST à la suite du séisme de Ain Temouchent (extraite de la « *synthèse des travaux d'expertise et d'évaluation des dommages* ») [1] reflète en fait la démarche adoptée généralement par les ingénieurs suite au séisme. Elle est décrite de manière succincte dans le paragraphe suivant.

2-1-1 Démarche de l'expertise

A la suite du séisme de AinTémouchent survenu le 22-12-1999, un déploiement d'équipes techniques a eu lieu le lendemain, celles-ci ayant pour mission d'évaluer les niveaux de dommages subis par les constructions. Leur démarche s'est effectuée en deux phases : la première, phase A, a consisté en une évaluation sommaire des dommages. Lors de cette phase, les ingénieurs sont munis de fiches techniques d'évaluation (voir annexe 4). Elle s'est soldée huit jours après par un rapport permettant l'adoption des premières mesures d'urgence en relation avec le cadre bâti.

Les travaux de la deuxième étape (phase B) ont visé quant à eux un approfondissement des études des expertises et une évaluation servant de base à la définition des divers programmes de reconstruction.

Classification des dommages

L'expertise consiste en une évaluation des niveaux de dommages qui sont définis en cinq (5) degrés permettant de classer la construction dans une des trois catégories des couleurs VERT ORANGE ROUGE.

- Les constructions siglées « VERT » sont celles ayant subi peu ou pas de dommage et pouvant être utilisables dans l'immédiat (niveau 1 & 2).
- Les constructions siglées « ORANGE » sont celles ayant subi des dommages et nécessitant une expertise approfondie qui permettra de décider si ces constructions peuvent ou non être récupérées moyennant un confortement ou une consolidation approprié (niveau 3 & 4) suivant l'importance et le coût des réparations.
- Les constructions siglées « ROUGE » sont celles ayant subi des dommages considérables et donc condamnées à être démolies et déblayées (niveau 5).

La fiche d'évaluation (voir annexe 4) comporte des renseignements d'ordre général (identification, usage, nombre de niveaux etc...) les observations concernant les problèmes de sols, de fondation et d'infrastructure, une évaluation des dommages subis par les éléments structurels et par les éléments secondaires, des commentaires sur les

causes probables des dommages ainsi qu'une évaluation globale du niveau général des dommages et des recommandations de mesure d'urgence le cas échéant.

Pour l'évaluation du niveau du dommage des éléments de la construction ou de la construction toute entière une classification à cinq niveaux a été utilisée (voir annexe 4)

Au terme de cette démarche systématique l'ingénieur est conduit à noter le niveau général des dommages et à attribuer à la construction l'une des couleurs précédemment citées.

Ce qui a été noté, par le nouveau groupe d'ingénieurs du CTC OUEST chargé de la phase B (et ayant pour la plupart été impliqué dans des travaux semblables pour d'autres séismes) c'est que lors de l'assainissement préparatoire à la phase B, un examen minutieux des fiches issues de la phase A, a révélé des imperfections, double emploi et fiches insuffisamment renseignées, ceci étant dû d'une part à l'hétérogénéité des équipes mises à contribution pour cette mission le lendemain du séisme et dont certains éléments n'avaient ni l'expérience ni la qualification utile à cette contribution. Et d'autre part le temps extrêmement court (08 jours) et l'insuffisance des infrastructures et logistiques devant permettre un bon déroulement de cette phase.

Au terme de la phase A, une seconde classification s'impose (phase B), elle concerne les populations du bâti siglé « ORANGE ». Ces constructions devront être soumises à un deuxième examen pour cerner les conditions de leur réutilisation et les risques encourus par leurs occupants.

2-1-2 Problématique d'estimation des dégâts

Une fois la liste des ouvrages classés « ORANGE » établie, un nouveau groupe d'ingénieurs ayant pour la plupart été impliqués dans des travaux semblables pour d'autres séismes est retenu. Ils procèdent à une expertise approfondie (phase B). Cette expertise portant sur les ouvrages siglés ORANGE par la première phase a permis de classer certains de ces ouvrages définitivement selon le degré de dommage confirmé « ORANGE ». D'après les experts consultés un fort taux d'unités de bâti siglé à l'ORANGE a été reclassé dans le VERT lors de la phase B. Ceci s'explique par le fait

qu'il est difficile de distinguer de manière claire entre les niveaux de dommages VERT 2 et ORANGE 3 de prime à bord d'une part et le manque d'expérience requise pour ce genre de mission pour une bonne partie des éléments composant les équipes qui ont travaillé durant la phase A.

La manière d'estimer les niveaux des dommages par une classification allant de 1 à 5 (pas de dommage jusqu'à démolition) a constitué le point de départ de notre recherche.

Tout le problème réside dans le jugement de la personne face à un cas précis d'éléments de structures endommagés. C'est d'ailleurs ce qui ressort de l'enquête menée par les experts lors de la phase A d'évaluation ; Il est à noter qu'en fait les ingénieurs qui n'avaient pas capitalisé l'expérience nécessaire dans le domaine de l'estimation éprouvaient des difficultés à donner un jugement unanime entre le niveau 2 classé VERT et le niveau 3 classé ORANGE. Ce qui a été remarqué c'est que généralement l'ingénieur à tendance à se mettre dans la sécurité en attribuant la valeur 3 (ORANGE) plutôt que la valeur 2 (VERT) car il n'est pas sans ignorer que le bâtis siglé à l'ORANGE fera systématiquement l'objet d'une réexpertise approfondie.

Pour répondre à cette question de savoir comment attribuer la valeur exacte du niveau du dommage, représentative des observations visuelles, on s'est orienté vers les experts qui ont capitalisé une expérience conséquente dans le domaine du diagnostic et des réparations des structures.

2-1-3 Résultats des interviews accordées par les experts du domaine

Ce qui ressort des interviews accordées par ces mêmes experts est que souvent ces derniers ont des difficultés à expliquer leur propre raisonnement face à des situations de diagnostic non pas parce qu'ils ignorent ce qu'ils font, mais souvent parce que les raisonnements qu'ils infèrent se font de manière naturelle et implicite. Car en fait, quand ils arrivent partant d'une observation visuelle du dégât à l'estimer au moyen d'un indice (1 à 5), c'est qu'ils ont déclenché de façon implicite un capital de connaissances, et d'heuristiques, (savoir quoi, savoir comment) accumulé au fil des années d'expertise.

A la question comment faite vous pour attribuer les valeurs de classification des niveaux d'endommagement ? Ils répondent que l'observation visuelle du dégât permet à elle seule de juger de la sévérité de l'endommagement. Certes c'est une réponse, mais pour l'ingénieur qui a pour tâche d'extraire la connaissance de l'expert dans le but de la formaliser, cette réponse reste très vague.

Cependant ce que nous avons découvert progressivement à travers les échanges avec les experts du domaine, et ce qui a aiguillé notre recherche est que leur estimation du niveau du dégât développé sur l'élément était d'apparence une estimation globale bien qu'en fait l'expert a recours de manière implicite à une observation détaillée du dommage.

Par exemple, lors de l'évaluation du degré d'endommagement d'un élément poutre ou poteau, l'expert observera les types de dommages ou conditions de rupture présents sur l'élément tels que la fissuration, l'éclatement, la dégradation ou l'écrasement du béton, le flambement ou non du poteau, l'état ou les conditions des armatures longitudinales...etc. Et c'est seulement après cette observation que l'expert jugera de la sévérité du dommage.

A titre d'exemple l'expert du domaine considérera qu'un élément poteau qui aura présenté un éclatement de béton avec apparition d'armatures longitudinales se verra assigné le niveau de dommage 3. Un autre élément poteau présentant un écrasement de béton, flambement et corrosion d'armatures représentera une rupture par rotule plastique. Le poteau se verra assigné le niveau de dommage 4. Une autre observation d'un poteau présentant un flambement implique qu'il faudra lui assigner le niveau de dommage 5.

Il est clair que la manière d'appréhender le problème de l'évaluation du niveau de dommages total présent sur un élément de structure compte tenu de l'évaluation individuelle des différents types de dommages comme fissure, éclatement, écrasement ...etc. n'est pas menée par les ingénieurs experts de façon explicite, c'est pourquoi nous nous sommes orienté vers d'autres approches concernant l'évaluation détaillée des dommages. Il s'est avéré par exemple qu'une classification du dommage fissure par

observation de la largeur de la fissure était possible. Plus la largeur de la fissure augmente (comprise entre 0.2 et 2 mm) et plus le niveau d'endommagement augmente.

Des tableaux de classification du niveau de sévérité de chaque type d'endommagement en fonction de son apparence sont fournis par des références japonaises [5] et Américaines [6].

Les références bibliographiques utilisées dans le problème des dommages post-sismiques et leur estimation, et qui proviennent pour la plupart de séminaires, de rapports et de publications pour la majorité japonaises et américaines sont présentées dans le paragraphe suivant. Les références concernant les modes de rupture probables développés dans les éléments de structures, ainsi que celles concernant les techniques de réparation et de renforcement des ouvrages endommagés sont également présentées.

2-2 Recherche bibliographique

Le problème de l'inspection et de l'évaluation des dommages post sismique constitue l'un des problèmes les plus délicats. Dans le cadre de ce projet une recherche bibliographique a été entreprise, le catalogue[5] et le document [6] comptent parmi les références les plus importantes dans le domaine de l'estimation.

Le catalogue [5] ou notes Ohkubo (1990) concernant l'inspection des dommages post-sismique décrit une classification des dommages en 5 niveaux associés avec des conditions de rupture développées dans l'élément tels que fissuration, épaufrure ou écrasement du béton. La sévérité de ces conditions de rupture est basée sur une reconnaissance visuelle de différents facteurs d'apparence comme largeur de fissure, exposition des armatures, apparence d'écrasement du béton et autres . C'est précisément cette classification qui nous a paru très importante car en fait elle permet de répondre à notre besoin de trouver une méthode pour l'estimation des niveaux d'endommagement des éléments à partir d'observation visuelle. Cette approche fait l'objet du paragraphe 4-4 du chapitre 4.

Le document [6] (ACI (1986) Comité 201) développé par l'institut américain de béton ACI (*American Concrete Institute*) fournit une base concernant l'identification des

conditions de rupture développées à la surface du béton, ainsi qu'une classification de la sévérité du dommage.

Les dommages causés par un séisme sont nombreux et prennent naissance dans une partie ou dans l'ensemble de l'ouvrage endommagé. L'ouvrage PENEZLIS , KAPPOS (1995) [7] concernant la résistance au séisme des structures en béton fournit une détermination des principaux dommages et leur causes par type d'élément ainsi qu'une classification des modes de ruptures.

Les catalogues [3] et [4] décrivent les techniques de conception et d'exécution des travaux de réparation et de renforcement des ouvrages. Le document [4] qui s'intitule « Catalogue et méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages » vise en premier lieu les travaux de reprise des bâtiments en maçonnerie et béton armé endommagés, il constitue le complément indispensable au document [3] intitulé « Document technique réglementaire relatif aux recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages » dont il constitue l'outil principal d'application.

Des références complémentaires dans le domaine de la classification des dommages et de la vulnérabilité à travers une échelle d'intensité macro-sismique européenne EMS (*European Macrosismic Scale 1992*) [8] fournissent des outils de compréhension. Cette classification s'intéresse au problème de vulnérabilité des structures face au séisme, c'est à dire à l'évaluation des dommages attendus aux constructions selon l'intensité du séisme de l'événement ou en d'autre terme prévoir le comportement d'une structure donnée lors d'un séisme donné. Cette approche a fourni une sémantique de niveaux de dégâts (*tels que Léger, Modéré, Grave, Effondrement, etc...*) que nous avons utilisée lors de notre travail. De plus la classification offerte par l'échelle E.M.S a permis de visualiser la description des dégâts ainsi que des niveaux de dommages qui leur sont associés (voir annexe 4).

Une autre approche pour l'estimation des dommages et la classification des bâtiments ainsi que leur utilisation future à la suite d'un séisme modéré a été développée en Yougoslavie en Macédoine à l'institut du génie sismique et sismologique de l'université



de « Kiril et Metodij » (1984) [9]. Cette approche ou méthodologie a été développée dans le but d'uniformiser la procédure pour :

1. l'examen ou l'inspection des dommages des bâtiments en zone urbaine et rurale.
2. établissement d'une base de données concernant :
 - Analyse des pertes en vies humaines
 - Une estimation des pertes économiques
 - Organisation d'un plan d'urgence et d'intervention post-sismique.
 - Planification des procédures de renforcement et de réparation.
 - Amélioration des règlements concernant la conception et l'exécution des constructions en tenant compte de l'aléas sismique.
 - Développement d'une base scientifique pour l'étude de la vulnérabilité des constructions existantes dans le but de prédire et de réduire les conséquences des séismes et atténuer le risque sismique dans les régions concernées par les séismes.

Le séisme de Turquie survenu le 17 Août 1999 à Izmit [10] a fournit des éléments de réponse sur les différentes causes d'effondrement des structures, et sur les effets généralement engendrés par le séisme. Il a permis de mettre en évidence des éléments de comparaison entre les spécifications et règlement parasismique Turque et les autres règlements qui prévalent dans le monde Arabe. Une introduction à la réhabilitation et des recommandations concernant le renforcement et la réparation des ouvrages sont également donnés.

2-3 Méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages et mesures d'urgence

Après avoir estimé l'endommagement d'un élément deux types d'actions sont recommandés [2] :

- 1) Les mesures d'urgence (étaieiment)
- 2) Les méthodes de réparation et de renforcement des éléments de structure

2-3-1 Mesures urgentes-étaieiment :

Des supports temporaires sont recommandés immédiatement après un séisme pour les bâtiments qui viennent de subir de sévères dommages, et qui restent malgré tout debout. Ces dommages peuvent être des destructions partielles de poteaux (rotules plastiques par exemple), de sérieuses fissures dans les poutres...etc. Des mesures immédiates peuvent soulager ces éléments endommagés en transférant leurs charges sur des supports temporaires et protéger ainsi la structure contre une future réplique.

Le but de cette protection temporaire est de procurer une résistance temporaire aux éléments endommagés et aux différentes liaisons dont dépend la sécurité du système structurel. La protection temporaire peut aussi procurer une sécurité pour les personnes se trouvant dans les environs du bâtiment endommagés tels que les trottoirs, les rues adjacentes, ainsi que pour les ouvriers qui installent le chantier pour la réparation et le renforcement.

L'étaieage pour soulager les poteaux sévèrement endommagés est la première phase à réaliser dans une opération de protection temporaire. Il est évident que les étais sont placés à l'étage où les éléments verticaux sont endommagés. L'étaieage peut être réalisé quelques fois dans un seul étage, comme indiqué sur la figure 2-1, mais les contraintes de cisaillement dans les poutres au droit des sections t-t (Fig. 2-1) doivent être vérifiées pour s'assurer que l'étaieage est efficace. L'étaieage qui est réalisé sur plus d'un niveau ou sur tous les niveaux du bâtiment procure une plus grande sécurité (Fig. 2-2). L'étaieage de tous les étages réduit les contraintes de cisaillement des poutres de part et d'autre des éléments verticaux endommagés.

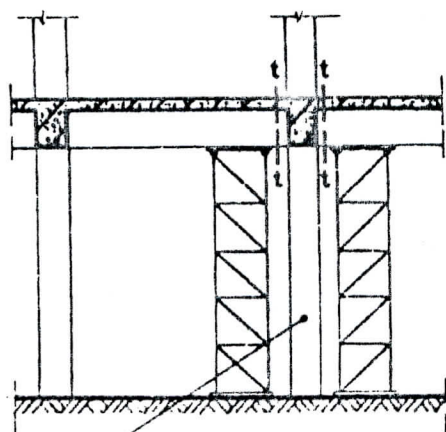


Fig.2-1 : Poteau à remplacer ou à réparer (*Etayage sur un niveau*)

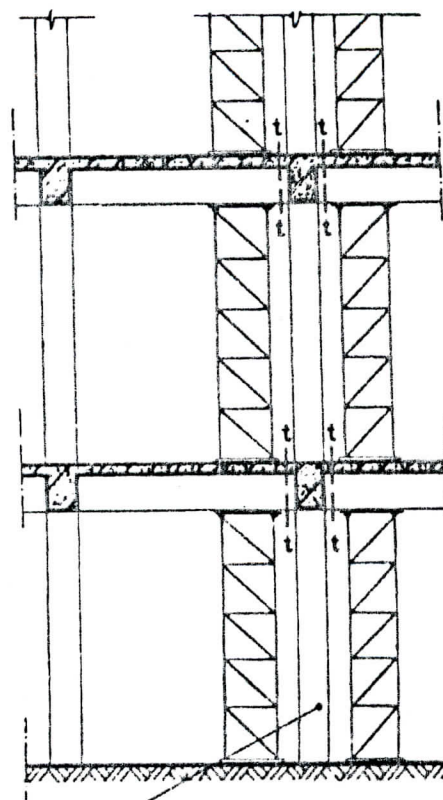


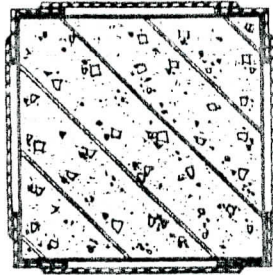
Fig. 2-2 : Poteau à remplacer ou à réparer (*Etayage sur tous les niveaux*)

On distingue deux méthodes d'étayage, l'une vis-à-vis des charges verticales, et l'autre étayage horizontal.

➤ Méthodes d'étayage vis-à-vis des charges verticales :

- Etai type industriel et échafaudage : les étais indépendants type industriels sont utilisés dans le cas de charges verticales relativement faibles, ils peuvent supporter une charge de 2 tonnes sur une hauteur de 3,00 m (Fig. 2-3). Dans le cas de faibles dommages et dans le cas où il faut étayer les éléments horizontaux, tels que les poutres et planchers, un simple échafaudage peut être utilisé .

- Etais en bois : les madriers, les troncs d'arbres peuvent être utilisées comme étais pour supporter les charges verticales. Les troncs d'arbres doivent être



Plats métalliques

Fig. 2-5 : *Etayage par profilés métalliques* [2]

➤ Etayage Horizontal :

- Soutènement latéral : Un des plus grands dangers que présente les murs extérieurs en maçonnerie ou en béton armé endommagé par un séisme, est leur instabilité. Ces murs, quand ils ne sont plus liaisonnés à la structure, ont tendance à s'écrouler pendant les répliques et peuvent occasionner des dommages aux structures adjacentes. Pour éviter ce danger, des soutènements peuvent être installés comme indiqué sur la (Fig. 2-6) Les éléments constituant ces soutènements peuvent être des madriers en bois, des troncs d'arbre ou des profilés métalliques.
- Etayage par diagonales : quand une structure à portique a été endommagée par un séisme, il est souvent nécessaire de placer des diagonales provisoires pour prévenir l'ouvrage d'un éventuel écroulement pendant les répliques (Fig.2-7). Les éléments en diagonales peuvent être des madriers en bois, des troncs d'arbre ou des profilés métalliques.

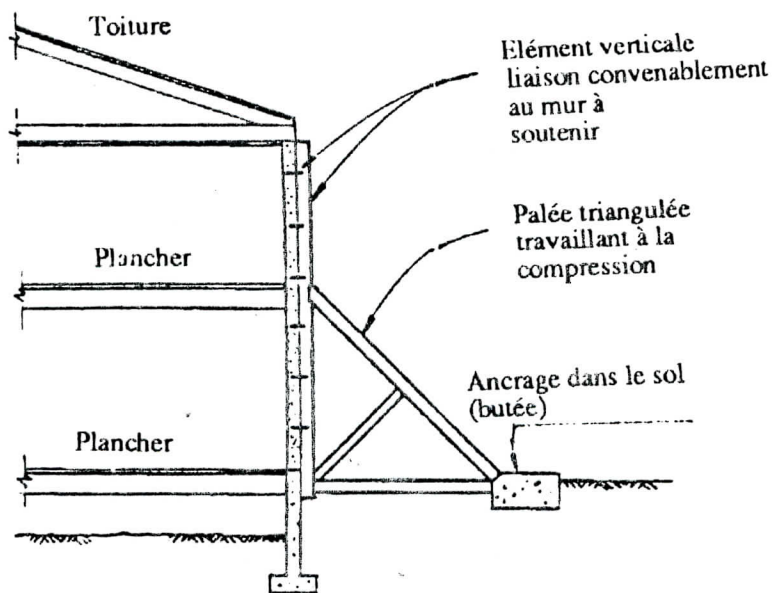


Fig. 2-6 : *Soutènement latéral* [2]

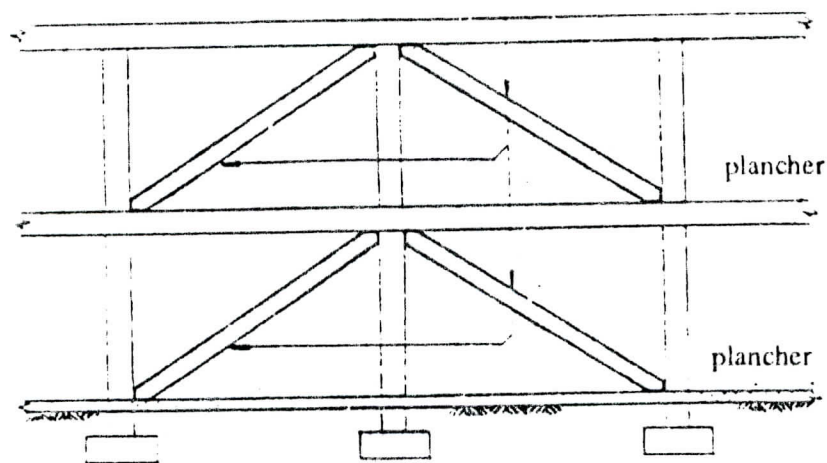


Fig. 2-7 : *Etayage par diagonales* [2]

2-3-2 Méthodes de réparation et de renforcement:

Les principaux procédés de réparation et de renforcement indique pour chaque cas particulier ce qu'il convient de faire et ce qu'il faut éviter de faire.

Définitions

- 1) *Réparation* : La réparation d'une construction est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu.
- 2) *Renforcement* : Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de ductilité, de la résistance ... etc.) d'une construction pour permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre les sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs (le séisme par exemple).

Un renforcement peut être associé à une réparation.

2-3-2-1 Travaux de réparation des éléments de structure:

1/ Poteau:

Deux techniques principales sont adaptées à la réparation des poteaux. Il s'agit de la technique *d'injection* si le béton n'est *pas dégradé* et du *gainage* dans le cas *contraire*. [3]

1-1/ Injection : C'est une opération qui consiste à faire pénétrer dans les fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes.

Les éléments en béton armé, isolés ou en réseau, endommagés dont les fissures sont stables et qui ont une largeur comprise entre 0.2 mm et 2 mm peuvent être réparés par la technique d'injection de résine. Il est bien entendu que le béton de zones fissurées n'est ni disloqué ni écrasé.

Les éléments dont les fissures dépassent 2 mm de large peuvent être réparés par injection de mortier époxydique.

Les travaux d'injection se font en deux étapes :

- Préparation des fissures
 - Injection proprement dite
- *Préparation des fissures* : on ignore souvent l'état interne des fissures. Pour cela il est absolument nécessaire de procéder à leur nettoyage, avant toute injection, à l'air comprimé. ou à l'eau sous pression. S'il y'a des traces de graisse ou d'huile, on peut utiliser des détergents à la condition d'effectuer par la suite une neutralisation.
 - *Produits d'injection* : Les résines époxydiques sous forme liquide sont généralement les produits d'injection les mieux adaptés. Ils présentent plusieurs avantages parmi lesquels on cite : la stabilité au stockage, un retrait faible (évitant ainsi les fissures dues au retrait), excellente adhérence au béton, faible viscosité (injection des fissures dont la largeur est $\geq 0.2\text{mm}$), propriétés mécaniques élevées, bon comportement en présence d'humidité, un pouvoir mouillant supérieure à celui de l'eau qui leur permet de se propager par capillarité, prise et durcissement rapides, bon comportement aux agents agressifs. Ces résines ont néanmoins un coût élevé et présentent un emploi délicat.
 - *Injection proprement dite* : on dispose les injecteurs de diamètres appropriés au débit d'injection prévu, servant à l'introduction du produit ou pouvant jouer le rôle d'évent. Les injecteurs sont des tubes disposés sur chaque face du poteau dans les forages interceptant la fissure. Ils sont en général espacés de 20 à 50cm. La fissure est elle même cachetée extérieurement avec un produit pâteux (colle époxy, mastic polyuréthane ou silicone, mortier étanche...). Après la pose des injecteurs et cachetage, on vérifie à l'air comprimé que la fissure n'est pas obturée et que la communication entre injecteurs et événements se fait correctement.

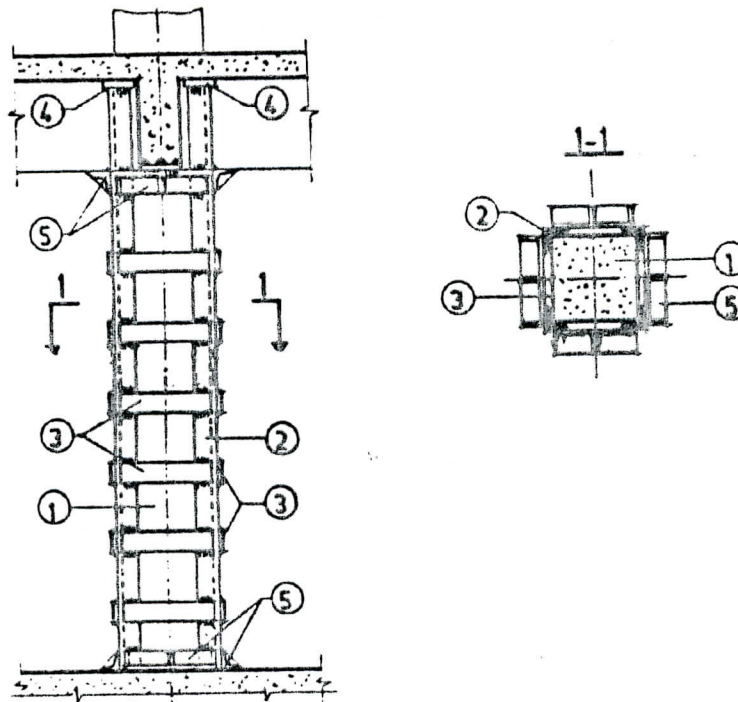
1-2/ Gainage : L'utilisation de gaine convient particulièrement à la réparation des poteaux . Cette technique consiste à restituer ou à accroître la section d'un élément de service (surtout celle d'un élément travaillant en compression) en le gainant de béton. Il n'est pas nécessaire que l'élément d'origine soit lui même en béton . Il est possible de gainer de béton des sections en acier ou en maçonnerie.

Il existe deux types de gainage :

- Gainage métallique
- Gainage en béton armé

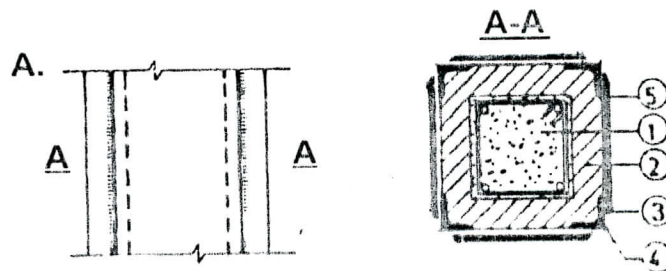
Gainage métallique :

Le gainage métallique consiste à enfermer le poteau dans une cage ou un tube métallique constitué par des fers plats et des cornières ou des tôles soudées. Cette technique est notamment utilisée avec l'injection quand il y'a des écrasements locaux du béton au niveau des fissures (fig.2-8 & 2-9). La gaine métallique est ensuite recouverte d'un enduit de ciment.



- 1- Poteau existant 2- Cornière métallique
- 2- Fer plat 4- Cales métalliques
- 5- Cornières

Fig. : 2-8 : *Gainage métallique* [4]



- 1- Poteau existant 2- Nouveau béton ou mortier
- 3- Soudure 4- Cornière métallique Cales métallique
- 5- Fer plat

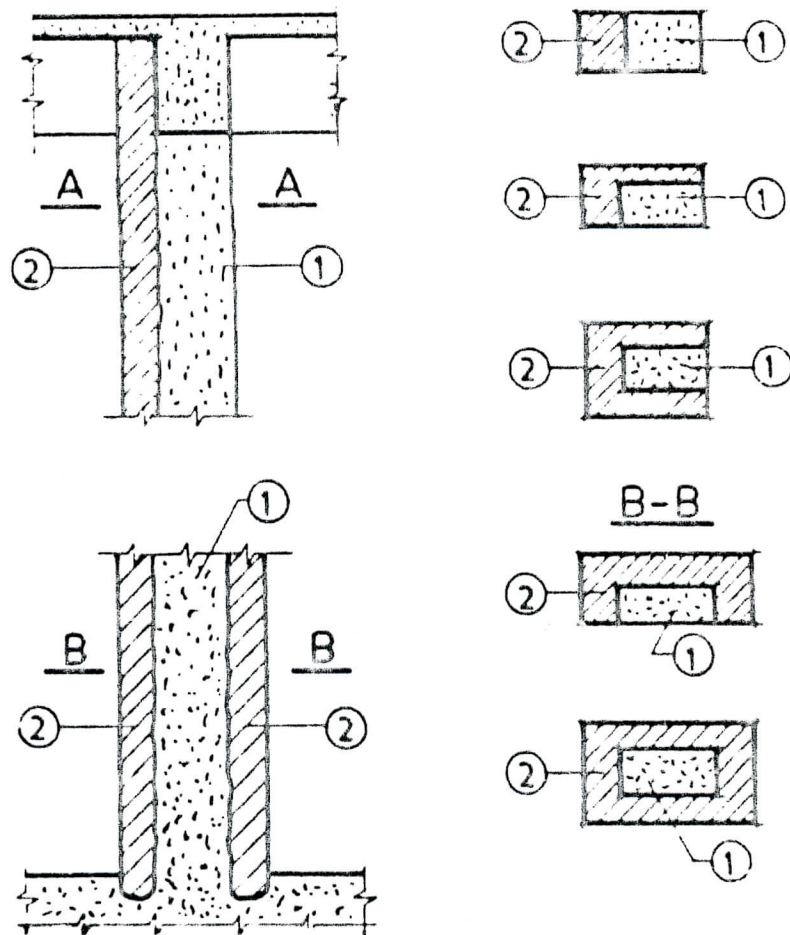
Fig. : 2-9 : *Gainage métallique avec augmentation de la section de béton* [4]

Gainage en béton armé :

Dépendant de l'espace libre autour du poteau, le gainage peut être réalisé sur une, deux, trois ou quatre faces de la section. Cependant il est recommandé de gainer les poteaux sur leur quatre faces pour avoir une bonne rigidité vis-à-vis du séisme (fig.2-10). Le ferrailage de la gaine est confectionné sur place, les diamètres et la quantité des aciers sont choisis suivant la résistance et la rigidité recherchées. Le gainage en béton armé peut être associé à un renforcement de la structure par des murs en béton armé ou des palés triangulés

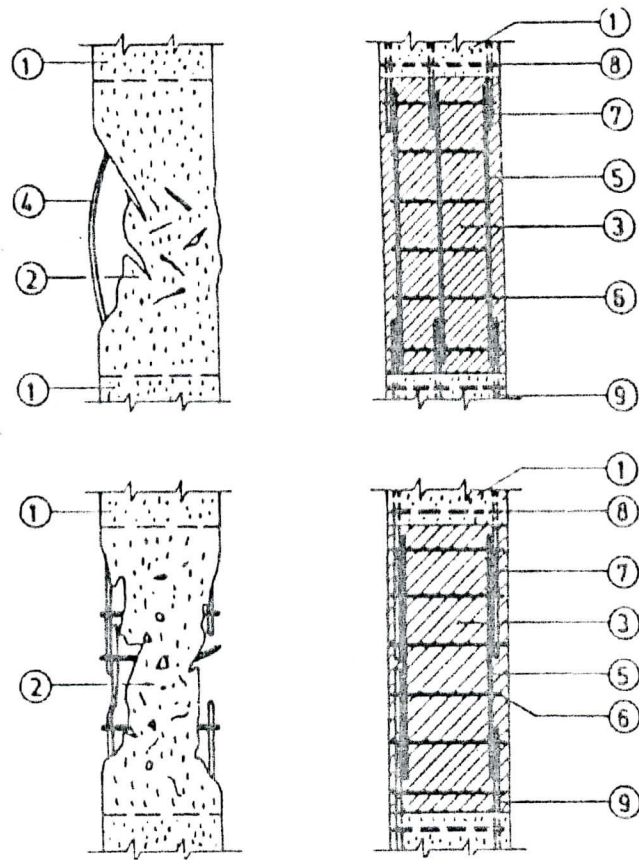
La surface de l'ancien béton qui doit adhérer à la partie nouvelle doit être rendue rugueuse par piquage. Il faut enlever tout le béton endommagé et ensuite procéder au nettoyage à grand jet d'eau pour éliminer toutes les poussières.

Le béton peut être mis en place par déversement par trémie ou tout autre procédé approuvé. Vu l'espace réduit de la gaine, la granulométrie du béton doit être étudiée pour permettre un passage facile des armatures. *L'utilisation de la technique de gainage impose la vibration du béton.* Quelques cas de gainages sont illustrés par les figures 2-10 et 2-11.



1- Poteau existant 2- Gaine en béton

Fig. : 2-10 : *Gainage en béton armé* [4]



1- Béton sain existant
4- Armature flambée
7- Soudure

2- Béton existant endommagé
5- Nouvelle armature
8- Cadres existants

3- Nouveau béton
6- Nouveaux cadres
9- Armature existante

Fig. : 2-11 : Bétonnage [4]

2/- Poutre:

Pour la réparation des poutres, plusieurs techniques sont utilisées parmi lesquelles on peut citer le gainage en béton armé et la précontrainte extérieure. [4]

1) Gainage en béton armé

Dans les gainages des poutres, la gaine peut être réalisée sur une, trois ou quatre faces. La figure 2-12 illustre un gainage sur quatre faces. Le béton armé de la gaine doit être conforme aux critères suivants :

- Les résistances des nouveaux matériaux ne doivent pas être inférieures à celle des anciens matériaux de la poutre.

- L'épaisseur de la gaine ne doit pas être inférieure à 4 cm dans le cas de béton projeté et 8 cm dans le cas de béton coulé
- Dans les zones nodales dont la longueur est égale à 4 fois la hauteur de la section de la poutre, l'espacement des aciers transversaux ne doit pas dépasser le quart de la hauteur de la section. Dans la zone courante, cet espacement peut être doublé.

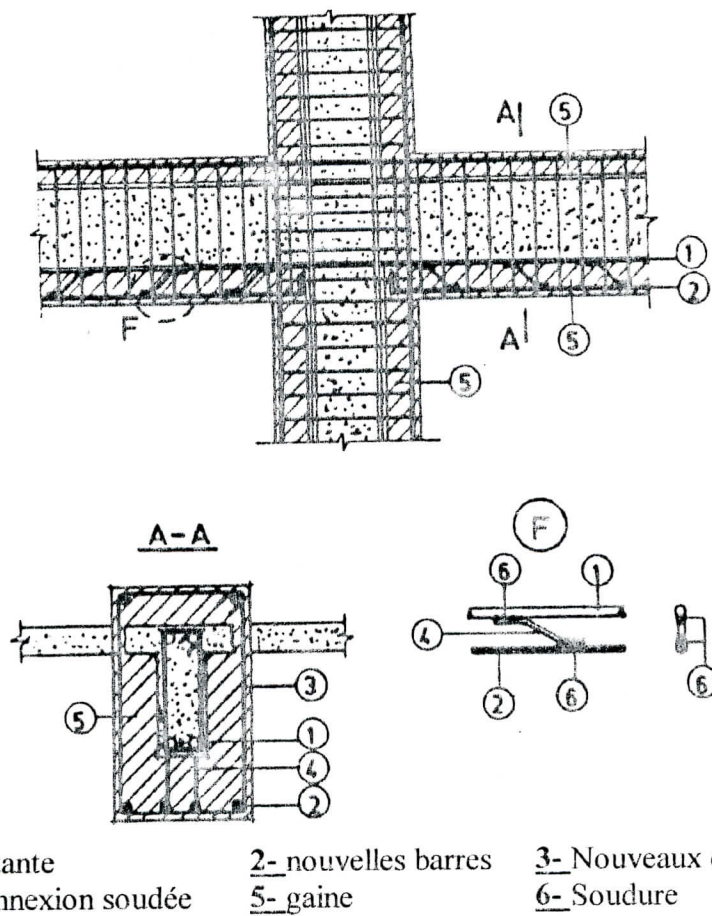


Fig. : 2-12 : Gainage en béton armé [2]

2) Précontrainte extérieure

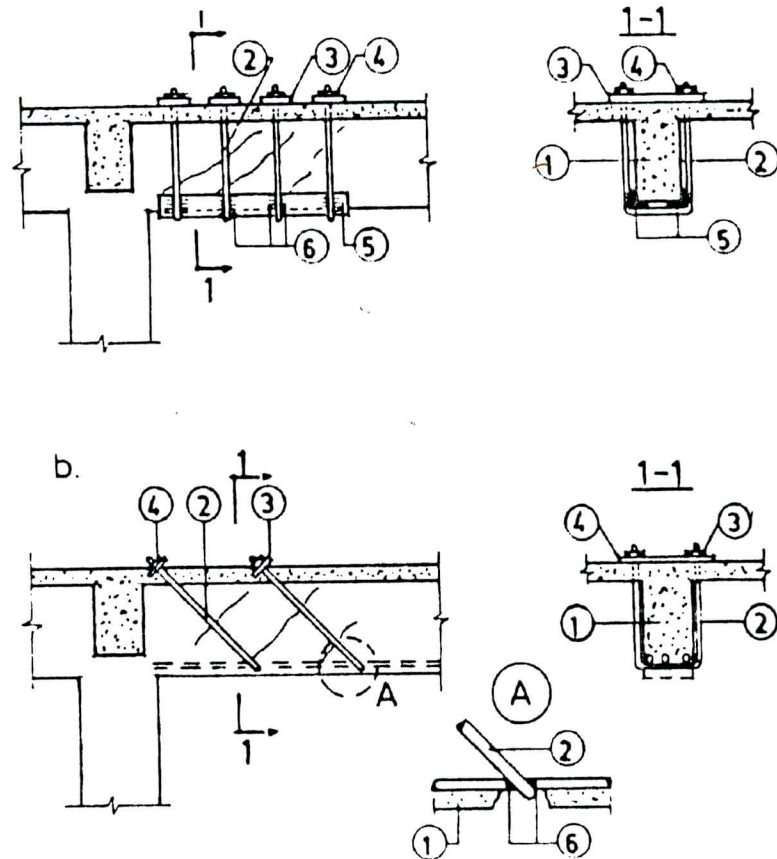
La technique de précontrainte extérieure permet la mise en œuvre et la conservation d'efforts de précontrainte appliqués à des ouvrages existants précontraints ou non dans le but de leur redonner leur état de service (réparation) ou de leur donner un nouvel état de service (renforcement).

Cette technique s'applique :

- Aux ouvrages en BP ou BA *présentant des insuffisances en flexion longitudinale ou à l'effort tranchant.*
- Aux âmes de poutre *présentant des insuffisances aux efforts tranchants et à la torsion*
- Aux pièces tendues en béton armé dont les aciers sont insuffisants ou défaillants (*tirants fissurés*)

3) Restitution de la capacité portante vis-à-vis des charges verticales

Des tiges métalliques peuvent être utilisées pour améliorer la résistance à l'effort tranchant des poutres endommagées ou non. Ces tiges peuvent être des cadres extérieurs verticaux ou inclinés, leur disposition doit être conforme à la fig. 2-13



- | | | |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------|
| <u>1</u> - Poutre existante | <u>2</u> - Agrafe métallique | <u>3</u> - Fer plat |
| <u>4</u> - Ecrou | <u>5</u> - Cornière | <u>6</u> - Soudure |

Fig. : 2-13 Restitution de la capacité portante de la poutre [2]

En résumé dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble sur l'estimation des dommages post-sismique, soit à travers les entretiens que nous avons eu avec les ingénieurs du domaine ou à travers une littérature étrangère. Nous avons décrit les procédures de réparations et de renforcement des ouvrages suite au séisme, et proposer les mesures d'urgences à prendre pour assurer un certain degré de sécurité à l'ouvrage avant d'entamer la réparation et le renforcement. Nous avons également donné nos références et nos sources concernant l'évaluation et la classification des dommages mais également celles concernant les recommandations et les procédures de renforcement et de réparation qui succèdent à l'étape d'évaluation.

Il est important de noter que l'étape d'évaluation des dommages post-sismique d'éléments de structure, et l'étape concernant les procédures de réparation et de renforcement, ainsi que des mesures d'urgence feront l'objet du chapitre 4 où une approche à travers un système expert est élaborée.

Chapitre 3

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EXPERTS

3-1 Intelligence artificielle et systèmes experts

Il est fréquent dans le monde réel que l'on doive prendre une décision sans disposer de toutes les données du problème, et il arrive aussi que la présence de données incomplètes soit inhérentes au problème à résoudre.

problèmes pour lesquels on ne connaît pas d'algorithme général de résolution et où la connaissance est largement fragmentée et les techniques de résolution fortement liées au savoir-faire de l'expert humain.

3-1-1 *Intelligence artificielle : définition et caractéristiques*

A/ Définitions

Plusieurs définitions de l'intelligence artificielle existent dans la littérature.

Jérôme GENSEL [11] définit l'intelligence artificielle comme étant le domaine de l'informatique dont le but est de faire accomplir par l'ordinateur des tâches qui effectuées par l'humain requerraient de l'intelligence.

Henri FARRENY [12] définit l'intelligence artificielle comme étant cette partie de l'informatique qui se préoccupe de la prise en charge par l'ordinateur des tâches intellectuelles, dont on ne sait pas comment les humains les assurent. Par exemple : faire un raisonnement de bon sens, comprendre un langage naturel, conduire une auto.

Alain BONNET [13] définit l'intelligence artificielle comme étant la discipline visant à comprendre la nature de l'intelligence en construisant des programmes d'ordinateur imitant l'intelligence humaine. Elle a pour but d'étudier et de concevoir des processus dits « intelligents » pour rendre les ordinateurs plus habiles en les dotant de certaines facultés de raisonnement.

B/ Caractéristiques

Les principales caractéristiques des programmes de l'intelligence artificielle (IA) sont les suivantes :

1. Absence d'algorithme : La première caractéristique des programmes d'IA est le fait qu'ils s'intéressent à des problèmes dont on ne connaît pas un algorithme, c'est à dire qu'on ne dispose pas d'une description de la suite d'actions à entreprendre afin d'arriver à une solution. De ce fait on essaie des heuristiques c'est à dire des méthodes informelles non garanties de succès. Une démarche heuristique consiste face à un problème à essayer un chemin en gardant la possibilité d'en essayer un autre si celui qui paraissait prometteur n'a pas conduit rapidement à une solution.
2. Représentation des connaissances : une deuxième caractéristique est que les programmes d'IA possèdent une représentation des connaissances, c'est à dire une correspondance entre le monde extérieur et un système symbolique permettant de raisonner. La représentation de la connaissance permet de rendre compte, de modéliser un domaine particulier d'application de sorte que la représentation ou le modèle obtenu soit manipulable par le système. La plupart des programmes d'intelligence artificielle séparent le plus nettement possible les connaissances du programme des mécanismes d'utilisation de ces connaissances. Ceci est du point de vue méthodologique très caractéristique d'un grand nombre de programmes de l'IA. Les programmes sont exprimés sous forme aussi déclarative que possible et donc facilement exposables.
3. Données incomplètes : une troisième caractéristique fondamentale des programmes d'IA est leurs capacité à fournir une solution même si toutes les données ne sont pas disponibles au moment de la résolution du problème. Les programmes d'IA s'accommodent de données plus ou moins conflictuelles. Dans beaucoup de sciences expérimentales, les erreurs des données ou d'observations sont fréquentes ; elles sont quelques fois dues à de simples défaillances humaines ; d'autrefois les conditions de l'expérience ne sont pas optimales (par exemple de mauvaises conditions météorologiques).
4. Apprentissage : Un critère de l'intelligence humaine est la capacité d'apprentissage, donc la faculté d'apprendre qui est à l'opposé de la faculté d'emmagasiner systématiquement tous les faits rencontrés. Il s'agira donc de

simuler dans l'ordinateur les processus qui lui permettent de distinguer les faits importants (à retenir) et les faits de peu importance (à oublier) afin de parvenir à un apprentissage semblable à celui de l'homme. [13]

5. Manipulation de variables symboliques : une cinquième caractéristique des programmes de l'intelligence artificielle (IA) est le fait qu'ils manipulent principalement des symboles autres que numériques, par exemple un programme établissant un diagnostic concernant l'endommagement d'une poutre va exploiter l'information « la fissure apparaissant à la surface de la poutre est égale à 1.5mm » sous forme symbolique « la fissure apparaissant à la surface de la poutre est sévère ».

C/ Domaines de l'intelligence artificielle

Les domaines de l'intelligence artificielle sont représentés dans la figure (3.1). Ces domaines incluent :

- La compréhension d'image ou la reconnaissance de forme
- La compréhension des langues naturelles ou traitement du langage naturel
- Résolution de problèmes
- Les programmes d'apprentissage
- Réseaux à neurones
- Robotique

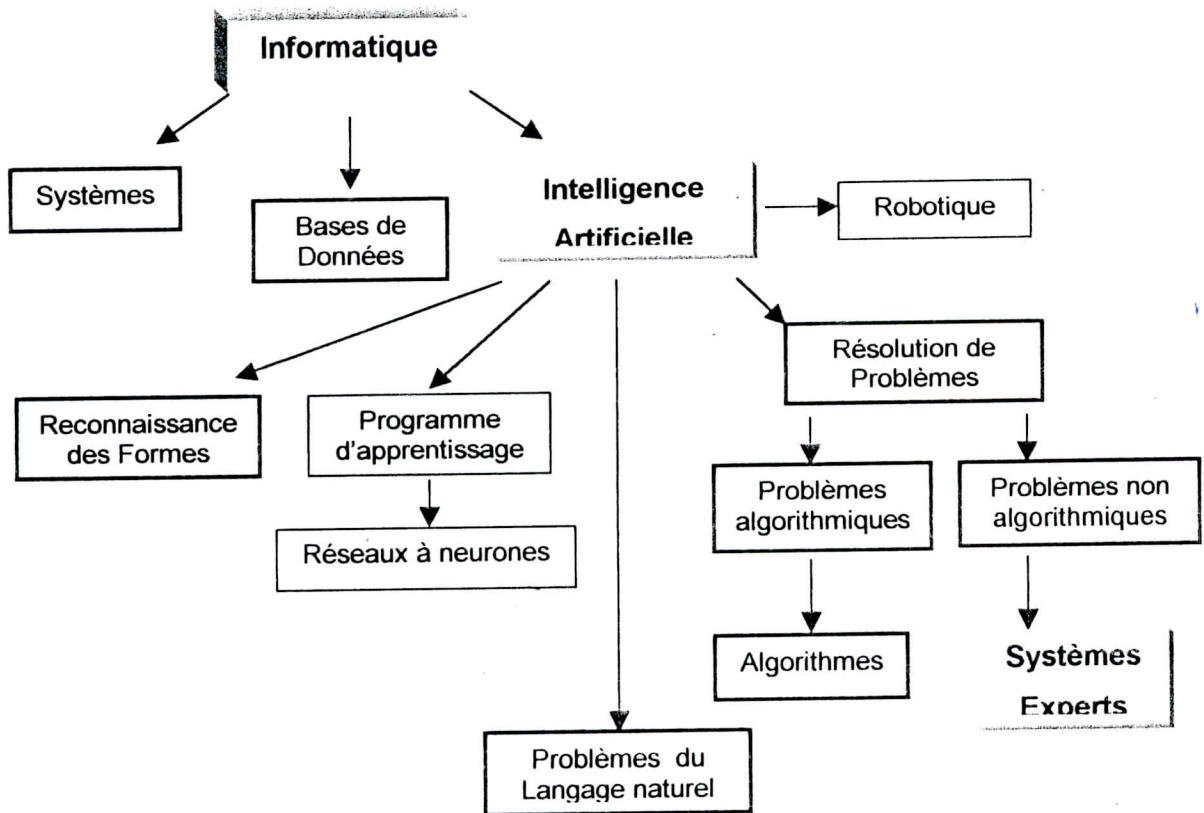


Fig. 3-1 : Branches de l'informatique

Dans ce qui suit et dans le cadre de notre projet on s'intéressera au domaine de la compréhension, la représentation et la résolution des problèmes : C'est le domaine des systèmes experts.

3-1-2/ *Systèmes experts ou systèmes à base de connaissance*

A. Historique

Dans les années soixante, une équipe de l'université de Stanford travaille sur la résolution d'un problème pour lequel on ne connaît pas de solution algorithmique: il s'agit de trouver la correspondance entre le spectre de masse et la formule développée d'un corps chimique [14]. C'était le premier système expert. L'idée fut d'introduire la connaissance des experts dans les ordinateurs en les rendant intelligents. Le concept de système expert

inclut l'idée selon laquelle cette connaissance des experts n'est pas noyée dans un algorithme, elle est explicite. L'expertise se traduit bien souvent par un ensemble de règles déductives qui reflètent par leur enchaînement le raisonnement des experts eux-mêmes. Le programme va lire ces règles et établir un raisonnement en tentant de les appliquer. [15]

B. Quelques définitions des systèmes experts

1982 Selon un prospectus de la société Teknowledge (USA), fondée notamment par B.Buchanan, R.Davis, E.Feigenbaum, et AL [16]

« ...Programmes informatiques qui incorporent la connaissance spécialisée et l'expérience d'un expert humain ; ce sont les résultats de l'ingénierie de la connaissance....L'ingénierie de la connaissance s'intéresse à la réalisation de programmes capables de performances au niveau d'experts parce qu'ils rassemblent un grand corpus de connaissances relatives à un domaine particulier d'application... »

1983 Selon la « British Computer Society » [12]

« ...Un système expert résulte de l'implémentation sur ordinateur d'une base de connaissances expertes de telle sorte que la machine puisse donner des avis intelligents ou prendre une décision intelligente à propos d'une fonction de traitement. Une caractéristique supplémentaire souhaitable, souvent considérée comme fondamentale, réside dans l'aptitude du système à justifier, sur demande, sa propre ligne de raisonnement d'une manière directement intelligible par le requérant. Le style adopté pour atteindre ces caractéristiques est la programmation à base de règles... »

A la lumière de ces définitions, nous comprenons pourquoi les systèmes experts (SE) font l'objet d'un si important engouement dans les milieux professionnels. En fait ils permettent d'aborder l'informatisation de certaines fonctions intellectuelles telles que l'identification ou le diagnostic de situation, la prévision d'événement, la conception d'objets, la planification d'acquisitions.

De telles fonctions sont souvent difficiles à modéliser sous forme d'algorithmes sûrs et définitifs. Les systèmes experts grâce à leur méthodologie arrivent à reproduire les facultés de décision ou de jugement des experts humains à travers des règles.



C. Rôle des systèmes experts

Les SE sont des systèmes de consultation de type interactif qui ont pour but d'aider les spécialistes à raisonner sur des problèmes complexes dans leur domaine d'expertise. Ils sont développés comme une technique informatique visant à atteindre les trois objectifs suivants [12] :

- capturer aisément les unités de savoir faire, c'est à dire faciliter l'expression des règles, par rapport à leur forme d'émergence chez les experts
- exploiter l'ensemble des unités de savoir faire c'est à dire combiner les groupes de règles (chaîner) pour inférer (soit dériver) des connaissances telles que jugement, décision, ou autres, et donner la possibilité d'expliquer le processus de raisonnement (capacité d'explication)
- supporter aisément la révision de l'ensemble des unités de savoir faire c'est à dire offrir des facilités pour les ajouts et les suppressions de règles (maintenance).

D. Domaine d'application des systèmes experts

Certains problèmes se prêtent bien à la résolution par des SE. Les classes de problèmes appropriés sont répertoriées comme suit [13] :

- Le diagnostic : détection, diagnostic de pannes, diagnostic médical, maintenance
- Détection d'anomalies dans un système (circuit par exemple)
- Aide à la décision : ce sont des outils d'aide à la décision (exemple programme Conception et réalisation de serrures : Système interactif d'aide à la décision « intelligent » Application au renforcement des réseaux électriques urbains [17].
- La classification : (exemple classification des animaux mammifères, invertébrés)
- L'analyse de situations et gestion de crise (expertise financière, bancaire, juridique économique).

3-2 Architecture générale d'un système expert

L'architecture d'un SE consiste en trois composantes interactives: une base de connaissances, un moteur d'inférences et une interface. (voir fig. 3.2)

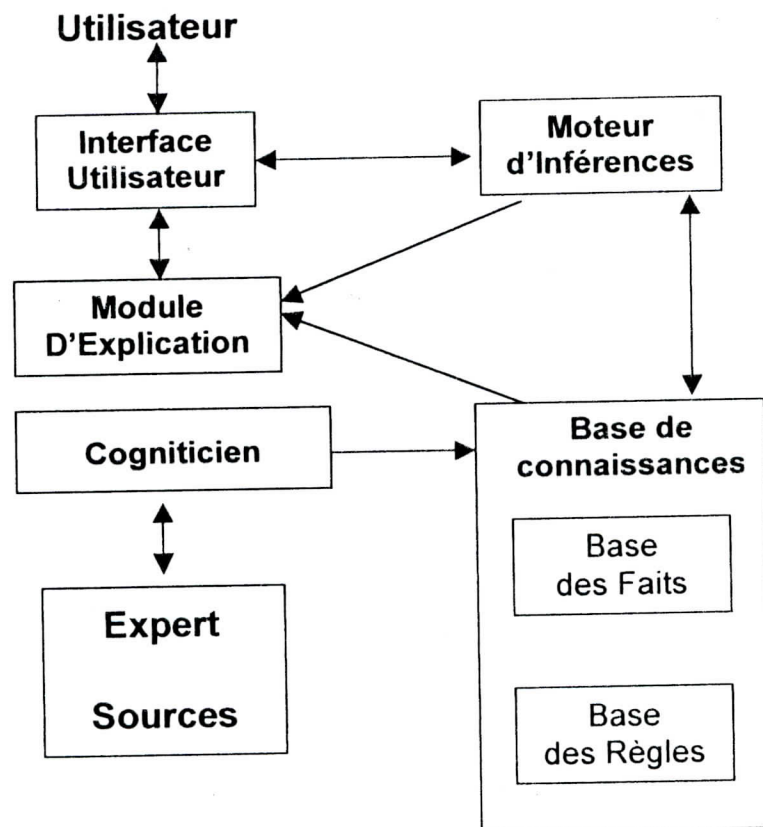


Fig. 3-2 : Architecture général d'un système expert [19]

1- La base de connaissances :

contient toute l'information dont un expert humain aurait besoin pour s'acquitter de son travail, ceci dans un domaine donné. C'est la seule composante du système qui contient les connaissances propres au domaine que le système est censé recouvrir. Cette base de connaissances est elle-même divisée en deux composantes:

- a) Base de règles : elle contient les principes généraux, des règles, des heuristiques de résolution de problèmes qui représentent les modes de raisonnement propres au domaine considéré .Ce sont les connaissances déductives souvent représentées par ce qu'on appelle des *règles de production*. La connaissance de ces heuristiques peut provenir, de la part de l'expert humain, soit d'une accumulation d'observations empiriques, soit de connaissances techniques propres au domaine.

La base de règles comprend des granules de connaissances opératoires qui présentent le savoir faire sur le domaine. La représentation de la connaissance par des règles consiste à reproduire le savoir de l'expert sous la forme :

SI [Prémisse(s)] ALORS [Conclusion(s)]

La partie prémisse d'une règle décrit les conditions de déclenchement de la règle en termes de faits. La partie conclusion décrit les modes opératoires à réaliser en cas de déclenchement.

Une caractéristique importante de la base de règle est qu'aucune règle ne fait jamais référence à d'autres règles mais communique à travers la base de faits. Cette propriété est importante car elle permet d'ajouter ou de supprimer une règle de la base sans modifier le système.

- b) Base des faits : elle contient des connaissances factuelles ou connaissances assertionnelles qui sont les données d'un problème, la description d'une situation donnée.

2- Moteur d'inférence : Le moteur d'inférence sert à inférer ou déduire des faits à partir de l'enchaînement ou le chaînage des règles entre elles. Plus d'explications seront données dans le prochain paragraphe (règles de production)

3- Interfaces utilisateur :

- a) Une interface de saisie grâce à laquelle les utilisateurs pourront obtenir une consultation du système expert. Ce peut être un formulaire dans le cas d'un

système fonctionnant en chaînage avant, ou un module de questions posées à l'utilisateur pour un système fonctionnant en chaînage arrière ou mixte.

- b) Une interface d'explication qui permet pour l'utilisateur à tout moment de questionner le système pour comprendre pourquoi une information lui est demandée.

4-Capacité d'explication : La capacité d'explication est basée essentiellement sur la possibilité du système de restituer à l'utilisateur la chaîne d'inférence ou l'enchaînement des règles dans l'ordre où elles ont été utilisées.

Il est également possible de faire suivre chaque règle par une note et une référence qui expliquerait respectivement ce que la règle fait et sa source .

3-3 Caractéristiques des systèmes experts

L'une des caractéristiques essentielles des systèmes experts est la séparation qu'ils pratiquent entre les connaissances qui leur sont nécessaires et le programme qui permet d'utiliser ces connaissances. Ces systèmes prônent l'opposition savoir comment / savoir quoi. Les connaissances déclaratives (savoir quoi) ont l'avantage de ne pas nécessiter des modes d'emploi au moment de leur définition, elles sont faciles à lire et à modifier, elles ont cependant besoin des secondes pour leur exécution. Les connaissances procédurales (savoir comment) ont les avantages et les inconvénients inverses. L'ensemble des connaissances déclaratives constitue une structure de données car elles jouent le rôle de données pour les procédures qui les interprètent.

En résumé les caractéristiques des SE sont les suivantes [13]:

- La connaissance est séparée du mécanisme d'inférence (interprétation),
- La connaissance est facile à lire et à modifier ,
- Opposition procédural /déclaratif (opposition savoir comment/savoir quoi),
- Les règles peuvent prendre en charge les incertitudes liées à certaines parties des connaissances
- Possibilité de fournir des procédures d'explication de leur ligne de raisonnement,

- Les données peuvent être incomplètes et incertaines.,
- Système = connaissance + inférence + contrôle,
- Manipulation de base de connaissance,
- Manipulation de connaissance symbolique (qualitative),
- Capture et restitue un jugement et expertise humaine,
- Maintenance à moindre coût,
- Les systèmes sont spécialisés dans un domaine,

3-4 Processus de développement d'un système expert

La démarche de développement d'un système expert est la suivante [19] :

Phase 1 : Identification et justification du problème : Il s'agit d'identifier le domaine du problème et justifier de l'utilisation d'un système expert pour résoudre ce problème qui nécessite la disponibilité d'expert

Phase 2 : Sélection des outils de programmation c'est à dire le Shell ou SE vide.

Phase 3 : Conceptualisation, formalisation, et implémentation c'est à dire trouver les concepts pour représenter et organiser la connaissance. La représentation de la connaissance et l'implémentation du système consiste à formuler c'est à dire à transcrire les connaissances de l'expert du domaine en des règles dans un format précis qui dépend du Shell utilisé.

Phase 4 : Test et validation des règles : il s'agit dans cette phase de vérifier :

- s'il y a concordance entre les conclusions auxquelles le système aboutit et les résultats de l'expert humain sur des cas identiques. Cette phase consiste à soumettre le système à des études de cas précis puis à confronter les résultats du système avec des experts.
- La qualité de la consistance du système c'est à dire que l'interaction entre l'utilisateur et le système soit cohérente (ordre des questions, contenu des questions)

- Que les performances du système ne se dégradent pas brutalement lorsque le problème sort de leur domaine de compétence qui est souvent étroit. Les systèmes doivent garder une certaine capacité d'inférer des données manquantes par un raisonnement de bon sens. Les performances du système doivent diminuer de façon continue aux bornes du domaine (graceful decay)

Phase 5: Maintenance et mise à jour

Ces étapes sont récapitulées dans l'organigramme suivant.(voir fig. 3-3)

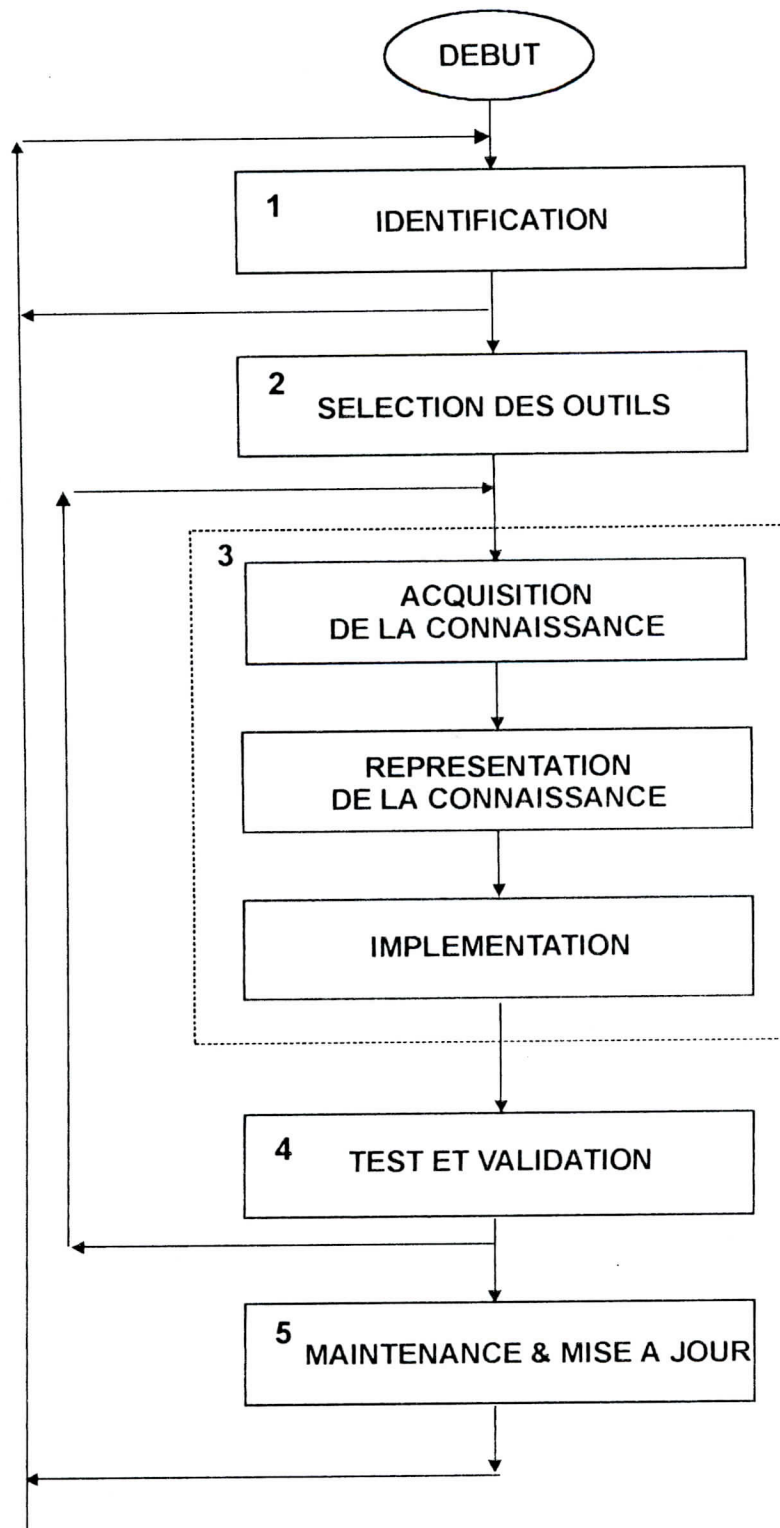


Fig. 3-3 : *Processus de développement d'un système expert*

Les systèmes experts sont conçus grâce à la contribution de :

- l'expert du domaine
- l'ingénieur de la connaissance ou le cogniticien

L'expert décrit son activité par un récit, il utilise ses connaissances des heuristiques qui reposent sur son expérience. L'utilisation d'heuristiques fournit une bonne solution et non pas la solution optimale qui n'existe pas toujours.

Le cogniticien formalise la connaissance en choisissant une représentation appropriée et une stratégie d'inférence. Il guide l'expert du domaine dans le développement d'une base de connaissance qu'il implémente par la suite en utilisant les langages ou les outils qui supportent les techniques adéquates de représentations des connaissances d'inférence et de contrôle.

3-5 Les principaux modes de représentation de la connaissance

Représenter les connaissances dans un ordinateur consiste à trouver une correspondance entre le monde extérieur et un système symbolique permettant de raisonner. Il n'existe pas de formalisme idéal pour représenter les connaissances.

Le but de la représentation de connaissances est de rendre compte, de modéliser un domaine particulier d'application de sorte que la représentation ou le modèle obtenu soit manipulable.

Les modes de représentation des connaissances se divisent en deux familles [13]:

1/ Formalismes basés sur des fondements mathématiques

- Logique des propositions et calculs des prédicats
- Règles de production

2/ Représentations structurées

- Objets structurés : représentation des connaissances par objets
- Réseaux sémantiques

3-5-1 Logique des propositions :

Le calcul des propositions se définit d'une part par sa syntaxe régissant l'ensemble des assertions exprimables dans un langage et d'autres part par ses règles d'inférences

décrivant comment on peut créer de nouvelles propositions à partir d'anciennes. Toute assertion est affectée de l'une des deux valeurs VRAI ou FAUX.

Le calcul des propositions repose sur la règle du Modus Ponens qui veut que si $A \Rightarrow B$ et que A est VRAI alors B est VRAI et du Modus Tollens alors $A \Rightarrow B \equiv (\neg B \Rightarrow \neg A)$.

Il est souvent pratique pour montrer que $A \Rightarrow B$ est VRAI de supposer que B n'est pas VRAI et de montrer que l'on aboutit à non A ce qui contredit l'hypothèse initiale qui était A, donc l'hypothèse non B est fausse et donc B est VRAI (raisonnement par l'absurde).

3-5-2 Calcul des prédicats :

Le calcul des prédicats est une extension du calcul des propositions. Il comporte la notion de prédicat et de symbole de qualification universelle et d'existentialité (\forall, \exists). Son intérêt par rapport au calcul des propositions est l'introduction de la notion de variable. Un prédicat est une fonction prenant un ou plusieurs arguments et retournant l'une des valeurs VRAI ou FAUX.

Par exemple IMPAIR (X) : « X est impair » aura la valeur VRAI si $X=5$ et FAUX si $X=4$.

3-5-3 Les règles de production

Les règles de production représentent le savoir faire de l'expert dans le domaine considéré qui indiquent quelles conséquences tirer lorsqu'une certaine situation est établie.

3-5-3-1 Définition

C'est une quantité de connaissances déclarative et autonome de la forme :

SI A_1, \dots, A_n ALORS B_1, \dots, B_m

Tableau 3-1 : Les deux parties d'une règle

Partie	Définitions	Type
A	Prémises, partie condition, déclencheur, partie gauche	Peut être composée ou simple $n \geq 1$
B	Conclusions, partie action, corps, partie droite	Peut être composée ou simple $m \geq 1$

3-5-3-2 Exemple de règle de production pour un système d'évaluation de la sévérité d'un dommage post-sismique sur un élément de structure

Si $\text{Largeur_Fissure} \geq 2 \text{ mm}$ Et $\text{Densité_Fissure} = 50\%$

Alors $\text{Dommage_Fissure} = \text{Très sévère}$

Dans la règle précédente, on recense plusieurs notions :

- Un Attribut : Largeur_Fissure , Densité_Fissure , Dommage_Fissure sont des attributs
- Une Valeur : 2mm, 50%, Très sévère sont des valeurs.
- Un Opérateur : c'est ce qui lie un attribut et une valeur. Dans notre cas, on a des opérateurs =, >=, et.
- Des connecteurs ici de conjonction : "et".

La partie gauche de la règle est appelée sa prémisse. La partie droite sa conclusion.

Une chose importante à comprendre est le fait que les opérateurs et les valeurs de la prémisse sont des opérateurs et des valeurs de comparaison ; Alors que les opérateurs et les valeurs de conclusion sont des opérateurs et des valeurs d'affectation.

Déclenchement de la règle :

Le système vérifie la prémisse en comparant les valeurs des attributs avec la base de fait. Par exemple, il va comparer Largeur_Fissure à la valeur 2mm, et si c'est le cas, c'est-à-dire si la Largeur de la fissure observée est effectivement ≥ 2 mm, alors, le système passe à la prémisse suivante. Si la Densité_Fissure observée est effectivement égale à 50%, alors la règle se déclenche.

Le déclenchement de la règle conduit à l'exécution des affectations de valeurs aux attributs présents en conclusion. Cela veut dire que le système tire les conclusions. Il affecte les valeurs en conclusion à leurs attributs respectifs. Par exemple il déduit que l'attribut Dommage_Fissure est Très sévère.

Par contre, si l'une des prémisses n'avait pas été vérifiée alors la règle eût été abandonnée.

Finalement, tout le but du système expert est d'affecter des valeurs à des attributs en déclenchant des règles.

Notion de fait :

Le raisonnement va se baser sur les faits pour déduire des conclusions, qui sont des affectations d'attributs dont on ignorait les valeurs.

En résumé nous avons :

- Règle - Règle qui se déclenche
- Attribut - opérateur - valeur
- Prémisse - conclusion
- Fait

Remarque

- Il peut y avoir des disjonctions "ou" en prémisse de la règle
- Une règle peut comporter plusieurs conclusions liées par des "et" conjonctifs

3-5-3-3 Chaînage

C'est le processus d'activation des règles l'une après l'autre jusqu'à l'obtention d'une (ou de toutes les) solution (s) ou d'un échec. Ceci est assuré par le moteur d'inférence (voir fig. 3-4)

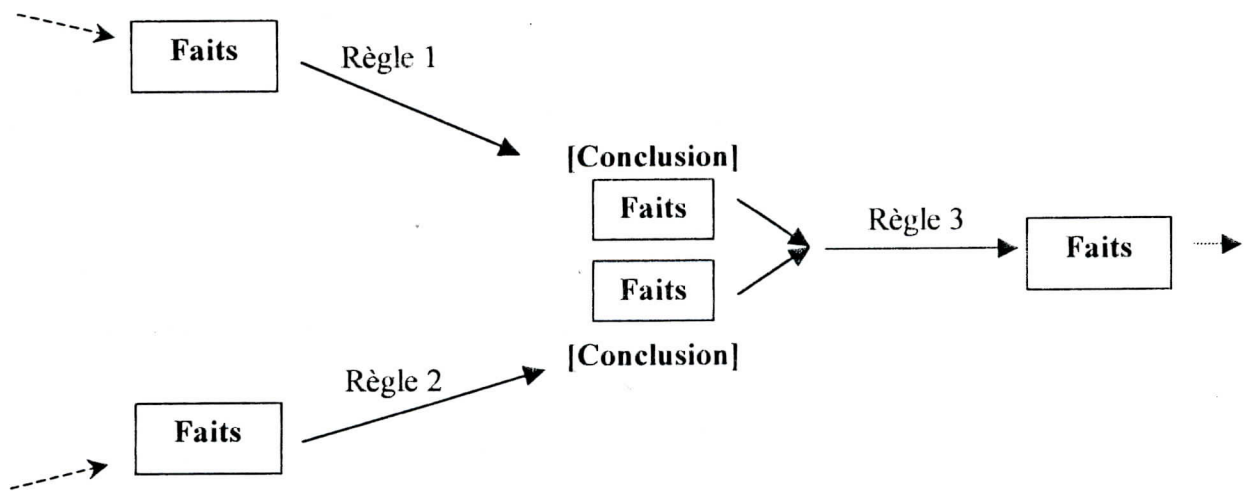


Fig. 3-4 : Chaînage des règles

A/ Le chaînage avant

Le chaînage avant consiste à considérer tous les faits présents dans la base de faits et de faire des inférences en utilisant les règles présentes dans la base de règles pour arriver à certaines conclusions.

Le moteur d'inférence examine chaque fait et toutes les règles où ce fait apparaît en prémisses. Grâce au mécanisme explicité plus haut, pour chacune de ces règles, il s'agit de vérifier si elle est déclenchée. Si elle l'est, le moteur affecte les attributs en conclusion des valeurs qui leur correspondent. On dit que les valeurs des faits sont propagées.

Ce processus continue jusqu'à épuisement des faits, et les résultats sont communiqués à l'utilisateur.

Le chaînage avant est résumé dans l'organigramme suivant :

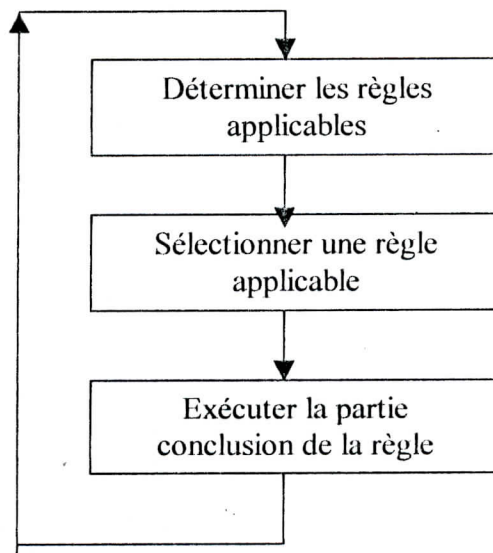


Fig. 3-5 : Organigramme chaînage avant [11]

L'avantage que présente le chaînage avant est sa simplicité. Son inconvénient réside en une inefficacité et un risque d'explosion combinatoire dans le cas de langage avec variables. Lorsque le nombre de règles qui risquent d'être activées est trop important, le moteur d'inférence va passer trop de temps à vérifier ces règles et notamment quand il y a des calculs dans les prémisses qui font appel à des routines.

B/ Le chaînage arrière

Le chaînage arrière procède d'une manière inverse en considérant d'abord les conclusions à vérifier, il détermine les règles qui aboutiraient à ces conclusions ou alors il pose des questions à l'utilisateur.

Le chaînage arrière permet d'obtenir une information sur un attribut. C'est une réponse à la question "Quelle est la valeur de A ?" où A est un attribut appelé but.

Pour déterminer la valeur de A, on dispose de sources d'informations. Ces sources peuvent être soit des questions à l'utilisateur lui demandant la valeur de l'attribut, soit des règles

dont l'enchaînement permet de trouver la valeur de l'attribut qui serait en conclusion d'une ou de plusieurs d'entre elles.

Pour chaque attribut, on définit ses sources.

- Si l'attribut est initial c'est-à-dire s'il n'apparaît qu'en prémisse de règle, les sources sont réduites aux questions.
- Si l'attribut est final, les sources sont les règles dans lesquelles l'attribut est en conclusion.
- Si l'attribut est intermédiaire, apparaissant à la fois en prémisse et en conclusion, alors les sources peuvent être les règles, ou alors on peut se replier sur les questions au cas où elles n'auraient rien donné.

Si, une fois la question posée, l'utilisateur répond, la valeur qu'il donne est affectée à l'attribut et c'est bon. Si les sources sont les règles, on prend chacune des règles où l'attribut apparaît en conclusion, et on essaye d'évaluer les attributs qui sont en prémisse. Si la règle se déclenche, l'attribut en conclusion est évalué.

Le chaînage arrière est résumé dans l'organigramme suivant :

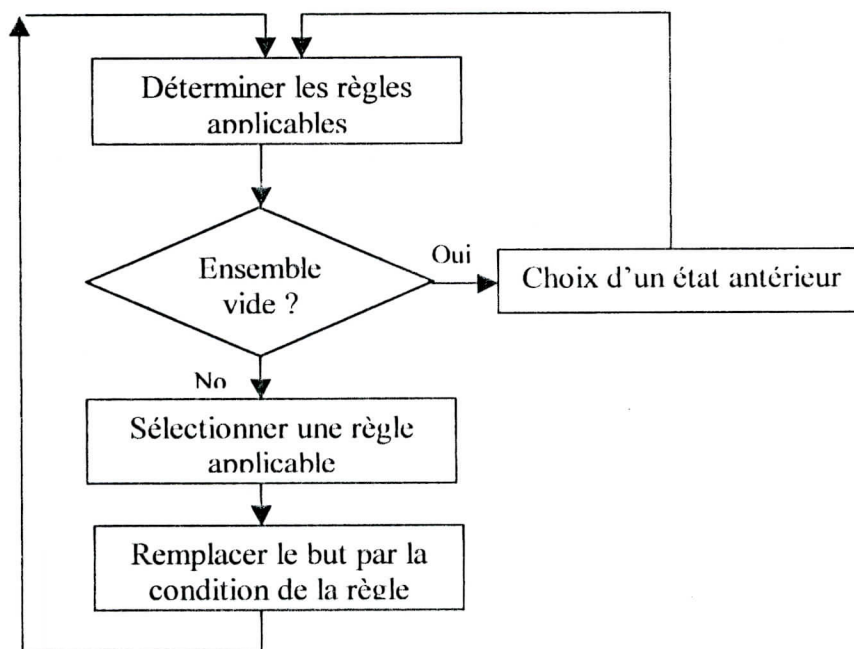


Fig. 3-6 : *Organigramme chaînage arrière [11]*

L'avantage que présente le chaînage arrière est une plus grande efficacité. Son inconvénient réside en une implémentation plus complexe.

Remarque

Généralement le chaînage avant est approprié lorsque de nouveaux faits sont introduits dans la base de connaissance, et que le but est de déterminer leurs conséquences. Le chaînage avant s'applique souvent dans des cas de simulations.

Le chaînage arrière s'applique lorsque des informations spécifiques sont nécessaires. Le but du chaînage arrière est de vérifier ou de contredire une conclusion particulière (et donc éviter la déduction de conclusions inutiles car sans rapport avec la conclusion visée). Le chaînage arrière s'applique dans le cas de recherche des raisons d'un diagnostic.

C/ Chaînage mixte

Le chaînage mixte consiste à faire appel, simultanément, en partie prémisse, à des faits établis (chaînage avant) et à des faits à établir (chaînage arrière).

Le chaînage mixte combine le chaînage arrière, inefficace à lui seul, à du chaînage avant. Ainsi après chaque évaluation d'une prémisse de règle, une propagation en avant de cette évaluation est faite pour tirer l'ensemble des conclusions qu'il est possible d'en tirer avant de reprendre le chaînage arrière.

3-5-3-4 Avantages et inconvénients de la représentation de la connaissance par les règles de production

Les règles de production se prêtent bien à l'expression du savoir-faire heuristique d'un expert. D'où le qualificatif d'« expert » accordé aux premiers systèmes qui les incorporaient (DENDRAL 1977 Chimie moléculaire, MYCIN 1977 diagnostic médical). [11]

a- Avantages

Parmi les avantages on cite :

- Les règles de production sont basées sur un formalisme mathématique (logique, prédicats), et donc très rigoureux du point de vue validation.
- Modularité : Les règles sont introduites en vrac dans la base de connaissance, elles ne font pas référence directement à d'autres règles, ce qui permet de les introduire dans l'ordre qu'on veut.

- Caractère naturel : cette représentation est naturelle à l'homme, ceci facilite la collection des connaissances et la compréhension du raisonnement.
- Modifiable : Il est très facile de retrouver une règle pour la modifier ou la supprimer. Ceci est possible parce qu'une règle est déclenchée, non pas par son nom ou son numéro mais indirectement par associativité avec son contexte de déclenchement, c'est à dire les faits en prémisses. Ce qui permet de modifier une règle ou la supprimer sans introduire d'incohérences dans la base de connaissances.

redondances ou des contradictions :

Redondance : Si A et B Alors C Si B et A Alors C

Contradiction : Si A et B Alors C Si B et A Alors non C

- Représentation homogène : Une seule façon de représenter les règles « Si Condition Alors Conclusion »
- Faculté d'auto explication : le chaînage des règles pour aboutir à un but fournit une bonne justification du raisonnement effectué par le système, par exemple en donnant les numéros des règles utilisées ce qui est suffisant pour expliquer pour expliquer les résultats intermédiaires et la conclusion finale.

b- Inconvénients

Les règles de production expriment souvent une connaissance apparente, superficielle qui peut occulter le raisonnement profond fondé sur un modèle éventuellement complexe des phénomènes mis en jeu, mené dans la réalité par un expert humain.

Pour palier à ces inconvénients les règles de productions sont souvent couplées à une représentation par objets, les deux modes de représentation (objets+ règles) se complétant bien, au sein de systèmes appelés « hybrides » (SMECI, KEE , KOOL , KAPPA...). [11]



- Caractère naturel : cette représentation est naturelle à l'homme, ceci facilite la collection des connaissances et la compréhension du raisonnement.
- Modifiable: Il est très facile de retrouver une règle pour la modifier ou la supprimer. Ceci est possible parce qu'une règle est déclenchée, non pas par son nom ou son numéro mais indirectement par associativité avec son contexte de déclenchement, c'est à dire les faits en prémisses. Ce qui permet de modifier une règle ou la supprimer sans introduire d'incohérences dans la base de connaissances.
- Lisibilité : Il est très aisé de lire la base de connaissances et de retrouver des redondances ou des contradictions :

Redondance : Si A et B Alors C Si B et A Alors C

Contradiction : Si A et B Alors C Si B et A Alors non C

- Représentation homogène : Une seule façon de représenter les règles « Si Condition Alors Conclusion »
- Faculté d'auto explication : le chaînage des règles pour aboutir à un but fournit une bonne justification du raisonnement effectué par le système, par exemple en donnant les numéros des règles utilisées ce qui est suffisant pour expliquer pour expliquer les résultats intermédiaires et la conclusion finale.

b- Inconvénients

Les règles de production expriment souvent une connaissance apparente, superficielle qui peut occulter le raisonnement profond fondé sur un modèle éventuellement complexe des phénomènes mis en jeu, mené dans la réalité par un expert humain.

Pour palier à ces inconvénients les règles de productions sont souvent couplées à une représentation par objets, les deux modes de représentation (objets+ règles) se complétant bien, au sein de systèmes appelés « hybrides » (SMECI, KEE , KOOL , KAPPA...). [11]

3-5-4 Représentation par objets

La représentation par objet consiste à regrouper dans une même entité « l'objet » toute information associée à un concept de l'univers du discours. L'information associée à un objet se trouve dans cet objet ou peut être acquise à partir de l'objet.

3-5-4-1 Caractéristiques des objets

Un objet est une structure à trois niveaux : **attribut, facette, valeurs**. [13]

Un objet contient un certain nombre d'ASPECTS ou ATTRIBUTS (slots) qui sont les noms des propriétés caractérisant l'objet : ces noms sont spécifiques d'un objet ; par exemple on parle de portée de section droite, de flèche pour une poutre. Ces Attributs contiennent des FACETTES qui sont bien répertoriées (standards) ; il y'a par exemple une FACETTE appelée VALEURS-POSSIBLES qui spécifient l'ensemble des valeurs permises pour l'ASPECT considéré ; une autre FACETTE s'appelle DEF AUT et indique la valeur par défaut de l'aspect en question, par exemple l'objet poteau court peut avoir l'ASPECT « mode de rupture » ayant par défaut le mode « cisaillement ». Un objet peut être représenté dans une hiérarchie et avoir des objets plus moins généraux que lui (l'objet DOMMAGE FISSURE est moins général que L'objet DOMMAGE mais plus général que l'objet LARGEUR FISSURE).

La représentation par objets est basée sur les notions de classes, d'instance, et d'héritage.

Les classes :

Une classe est la description d'une famille d'objets ayant même structure et même comportement [18]. Elle regroupe un ensemble de données et un ensemble de procédures ou de fonctions. Chaque classe possède une double composante :

- Une composante statique, les données, constituées de *propriétés* nommées, qui possèdent une valeur. Les propriétés caractérisent l'état des objets pendant l'exécution du programme.
- Une composante dynamique, les procédures appelés *méthodes*, qui représentent le comportement commun des objets appartenant à la classe. Les méthodes manipulent les propriétés des objets et caractérisent les actions pouvant être effectuées par les objets.

L'instanciation :

La classe est l'entité conceptuelle qui décrit l'objet. Sa définition sert de modèle pour construire ses représentants physiques appelés *instances*. Une instance est donc un objet particulier qui est créé en respectant les plans de construction donnés par sa classe. Celle-ci joue le rôle de moule permettant de reproduire autant d'exemplaires que nécessaire.

Puisque les méthodes représentent les comportements communs aux instances, il est inutile de dupliquer le dictionnaire des méthodes, qui est par conséquent détenu par la classe. De plus si les instances d'une classe possèdent les mêmes propriétés (appelés également variables), ceux-ci prennent cependant des valeurs différentes correspondant à la nature particulière de chaque instance : la liste des propriétés reste donc détenue par la classe, tandis que les instances en possèdent les valeurs.

Une instance ne peut exister sans sa classe d'appartenance, qu'elle connaît grâce à la relation d'instanciation

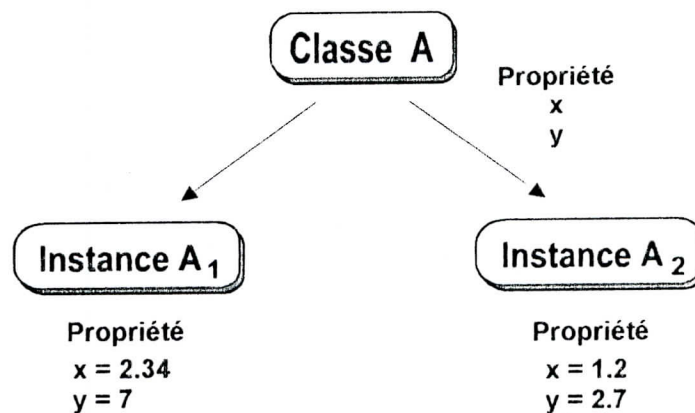


Fig. 3-7 : *Diagramme des Classes et instances*

L'héritage :

- *Spécialiser et factoriser*

Il s'agit d'un problème de partage efficace de connaissances. La classe doit être considérée comme un réservoir de connaissances à partir duquel il est possible de définir d'autres classes plus spécifiques, complétant les connaissances de leur classe mère. Les

connaissances les plus générales sont ainsi mises en commun dans des classes qui sont ensuite spécialisées par définition de sous-classes successives, contenant des connaissances de plus en plus spécifiques.

Une sous-classe est donc une spécialisation de la description d'une classe, appelée super classe, dont elle partage les variables et les méthodes. Conceptuellement tout se passe comme si les informations de la super-classe étaient recopiées dans la sous classe : une sous-classe hérite des informations de sa super-classe.

La spécialisation d'une classe peut être réalisée selon deux techniques. La première est l'enrichissement : la sous-classe est dotée de nouvelles variables et /ou de nouvelles méthodes représentant les caractéristiques propres des sous-ensembles d'objets ainsi décrit. La seconde technique est la substitution qui consiste à donner une nouvelle définition à une méthode héritée lorsque celle ci se révèle inadéquate pour l'ensemble des objets décrits par la sous-classe.

- Le graphe d'héritage :

La relation d'héritage [18] lie une classe à sa super-classe. Les classes sont organisées hiérarchiquement . Le graphe constitue un arbre dont la racine (Root) représente la classe la plus générale, appelée objet. Cette classe est prédéfinie et détient le comportement commun à tous les objets : comment imprimer un objet, comment trouver la classe d'appartenance d'un objet...etc. C'est à elle que sont rattachées les classes de plus haut niveau.

La relation d'héritage est transitive : les caractéristiques des classes supérieures sont héritées par les classes inférieures, qui sont d'autant plus spécialisées qu'elles sont proches des feuilles de l'arbre. Par extension de la définition donnée précédemment, le terme super-classe désigne toute classe dont hérite une classe donnée.

La structuration en classe et sous-classe entraîne une modularité importante : La description de l'univers est divisée en parties indépendantes regroupant les objets par affinité. La modification de l'une d'elles n'entraîne qu'un minimum de modification des autres. Ce fait est bien mis en évidence par le graphe d'héritage : chaque sous arbre regroupe des objets partageant les caractéristiques de sa racine. En principe, la modification de cette racine n'a d'incidence que sur ses sous-classes.

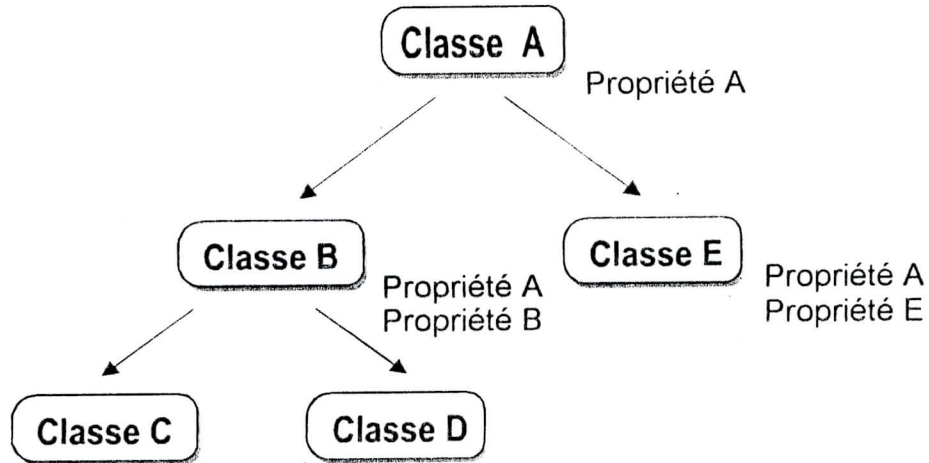


Fig. 3-8 : *Graphe d'héritage*

3-5-5 Réseaux sémantiques

Un réseau sémantique est un ensemble de points appelés nœuds reliés par des arcs [13]. Les nœuds représentent les concepts et les arcs les relations entre les concepts.

Exemple

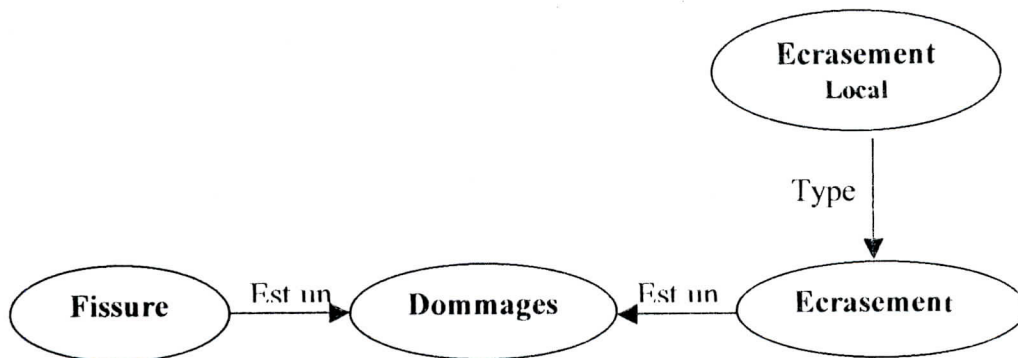


Fig. 3-9 : *Réseaux sémantiques*

Les réseaux sémantiques ont été utilisés en particulier pour la compréhension des langages naturels [13].

3-6 Systèmes experts dans le domaine du Génie-civil

Comme dans tous les domaines de la science, le domaine du génie civil s'est développé en diverses disciplines. Chaque discipline a ses propres complexités et un niveau spécifique d'expertise, par conséquent il devient difficile pour un ingénieur de maîtriser toutes ces disciplines. Plusieurs auteurs ont vu l'utilité de développer des systèmes experts dans ce domaine.

Les domaines du diagnostic, de la conception, de la maintenance et de la réparation sont des domaines où beaucoup de systèmes experts ont été développés. Quelques-uns sont présentés dans le tableau 3-3. [20]

Tableau 3-2: Quelques systèmes experts dans le domaine du génie civil [20]

Système expert	Description
SPERIL 1 & 2	Analyse du dommage sismique (<i>Seismic damage analysis</i>)
DASE	Expert system for damage assessment of structural concrete elements
PCPILE	Diagnostic des dommages de pieux en béton précontraint (<i>Damage diagnosis of prestressed concrete pile</i>)
DAMP	Diagnostic des dégâts de l'eau occasionnés au bâtiments (<i>Diagnosis of water damage to buildings</i>)
RETWALL	Système de conception des murs de soutènement (<i>Retaining wall design system</i>)
DESTINY	Conceptual design of an integrated building design environment
REPCON	Système expert pour la réparation et la maintenance du béton
BRIDGE-1et 2	Système expert pour l'inspection et la maintenance des ouvrages d'art

3-7 Systèmes experts développés dans le domaine de l'estimation des dommages

Différents systèmes experts ont été développés dans le domaine de l'estimation des dommages survenus sur des structures, dans ce qui suit quelques uns seront présentés de manière succincte.

- ❖ Le premier est SPERIL-1 (Seismic Damage Analysis) suivis de ses deux versions SPERIL-2 et SPERIL-3.
 - SPERIL-1 est un système expert basé sur des données d'inspections visuelles et d'enregistrements d'accélération sismique. Ce système fournit la conclusion la plus plausible pour un problème donné en utilisant toutes les informations disponibles et assigne un coefficient de certitude aux conclusions. Cette première version utilise des observations des dommages locaux sur un élément de structure spécifique tels que flambement des poteaux, déformations des poutrelles, épaufrure ou fissuration remarquable des planchers, nombre important de petites fissures sur les poteaux, réduction de la capacité portante des voiles, et autres.
 - SPERIL-2 [20] diffère de la première version en ce sens que le système traite les observations des dommages post sismique de manière globale. L'estimation des dommages observés dépendant du type d'élément de structure (poutre, poteau) a une implication globale sur la classification du bâtiment selon trois catégories : satisfaisant, questionnable, insatisfaisant.
- ❖ DAPS [20] : c'est un système expert développé pour estimer des dommages des structures protectrices (abris souterrains) ayant subies un chargement intensif et impulsif (Cas d'explosion). Ce SE est basé sur la description des dommages (tels que le cisaillement direct, la flexion) et sur leurs niveaux de sévérité (aucun, faible, modéré, sévère, etc.). Le SE aboutit à des conclusions portant sur les notions suivantes à savoir est ce que la structure est intègre, fonctionnelle ou réparable. Le point fort de DAPS est la combinaison des données numériques et linguistiques (sémantiques) en utilisant la logique floue et les facteurs d'incertitudes. Une caractéristique de ce système est l'introduction aux niveaux des interfaces de données illustrées qui facilitent l'interprétation des questions posées à l'utilisateur par le SE.

- ❖ RAISE [24] : C'est un système à base de connaissance développé pour l'estimation des dommages de bâtiments industriels, possédant deux versions, la première concerne une estimation fiable des dommages des portiques en béton armé, la seconde est généralisée à tous les types de bâtiments en béton armé. RAISE-2 a la particularité de diagnostiquer les dommages de la structure toute entière ou d'éléments de structure grâce à un modèle de reconnaissance des dommages.
- ❖ PCPILE [25]: est un SE pour le diagnostic des dommages des pieux en béton précontraint durant leur construction. L'architecture de PCPILE est divisée en deux parties, chacune d'elles comportant deux sous-parties : (1) Une base de connaissance : (a) Connaissance à base de règle ; et (b) Connaissance à base de cas ; et (2) Un moteur d'inférence : (a) moteur d'inférence déductif ; et (b) moteur d'inférence par analogie. Le moteur d'inférence fonctionne principalement avec un mécanisme déductif en chaînage arrière, cependant lorsque le système ne peut satisfaire au but diagnostiqué, une base de cas est ouverte pour permettre le mécanisme d'inférence par analogie. La logique floue est employée pour représenter l'aspect subjectif de l'évaluation, l'imprécision des données et la connaissance basée sur l'expérience.
- ❖ Un autre système expert a été développé par FURUTA [26] pour l'évaluation de la durabilité des structures. La durabilité des structures a pour but d'estimer la durée de vie d'une structure, elle est basée sur le niveau d'intégrité fonctionnelle et sur le niveau de dommage de la structure. Le niveau d'intégrité fonctionnelle est défini comme une mesure de l'état de service, et le niveau de dommage de la structure est défini comme une mesure de l'état de sécurité. Lors de l'évaluation de la durabilité le SE nécessite des données qui sont extraites soit de documents disponibles, de résultats d'observations visuelles, d'essais insitu, d'essais en laboratoire et d'analyse de la structure. Parmi les facteurs qui affectent la durabilité de la structure et qui sont pris en compte par le système on cite le flambement, les vibrations, la corrosion et autres. En définitif, le SE fournit des informations utiles quant au fait de laisser la structure telle qu'elle, de la renforcer ou de la démolir. Ce SE utilise des règles de production.
- ❖ Un système expert dans l'évaluation du risque sismique a été développé par MAHIER, M. L [20] , il modélise l'expérience des ingénieurs et des chercheurs dans le domaine

de l'analyse du risque sismique des bâtiments existants en combinant différents paramètres tels le mouvement des terres, la vulnérabilité des structures et l'impact social qu'entraîne le séisme.

- ❖ Un autre SE CRACK [27] (Consultant Reasoning About Cracking Knowledge) a été développé dans le domaine de l'endommagement par fissuration des ouvrages d'art. Ce système correspond à un prototype de recherche sur le phénomène de fatigue et de fracture mécanique qui surviennent sur les ponts métalliques des autoroutes. Ce prototype identifie les types de fissures qui seraient susceptibles d'être développées sur un pont particulier. Ce système fournit des informations sur les causes probables des fissures, leur localisation et le danger qu'elles entraînent.
- ❖ UNSE a été également développé en Tchécoslovaquie [28], il porte sur le diagnostic des causes de fissuration des bâtiments en maçonnerie et recommande l'adoption des réparations adéquates les moins coûteuses. La base de connaissance est représentée par des règles de production de la forme SiAlors. Ce système tient compte de l'incertitude de la règle, des prémisses ainsi que des données imprécises. Le système pose une série de questions préliminaires à l'utilisateur ; les réponses émises par ce dernier seront utilisées par le système pour sélectionner un certain nombre de causes. Il arrive souvent que pour certains cas le système ne puisse pas déterminer une cause unique du dommage fissuration, soit parce que les données initialement fournies sont incomplètes, soit parce que le dommage fissuration résulte de la combinaison de deux ou plusieurs causes. Le système offre à l'utilisateur la possibilité de choisir quelle cause sera investie en premier. Si celui-ci ne fait aucun choix, les causes seront investies dans l'ordre dans lequel elles ont été données.
- ❖ Le SE REPCON développé en Allemagne à l'institut de Massivbau [29] pour la maintenance et la réparation du béton, assiste les ingénieurs dans l'évaluation des dommages des structures et propose les réparations en accord avec les règlements de l'association Allemande du béton et du béton armé. Ce programme qui contient plus de 400 règles pour le diagnostic des dommages du béton offre à l'utilisateur une grande facilité de dialogue grâce à des images qui illustrent les dommages typiques des structures et les types de réparation.

- ❖ Un autre SE concerne l'inspection et la maintenance des ouvrages d'art en béton armé. Ce système est axé sur un type de dégradation en particulier la corrosion des armatures due à la carbonatation et aux chlorides. Ce système est divisé en deux sous systèmes : BRIDGE-1 BRIDGE-2.

le premier BRIDGE-1 est utilisé lors de l'inspection de l'ouvrage sur site. Le système fournit des informations quant aux causes des défauts observés, et offre une méthode de diagnostic appropriée.

Le second BRIDGE-2 est utilisé dans l'entreprise. L'ingénieur chargé de l'inspection introduit les résultats du diagnostic sur site auquel il ajoute les résultats obtenus lors des essais en laboratoire.

Le système restitue à l'utilisateur une analyse détaillée de l'état de l'ouvrage et permet une aide à la décision en fournissant : 1) une mise à jour et une estimation de la fiabilité de l'ouvrage d'art 2) une décision concernant si une estimation des éléments structuraux du pont est nécessaire ou non 3) une décision concernant la nécessité ou non d'entreprendre des réparations 4) Si telles est le cas , quelles sont les procédures de réparation adéquates 5) le temps des réparations.



3-8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue d'ensemble sur les systèmes experts qui peuvent s'appliquer dans des domaines divers tels que le diagnostic, l'identification, la prévision d'évènements ou tout autre domaine où on ne dispose pas d'algorithmes de résolution de problèmes.

Nous avons passé en revue les caractéristiques de ces systèmes, leur rôle pour représenter le savoir faire des experts humains. Nous avons également présenté les différents aspects fondamentaux des systèmes à base de connaissances et leurs mécanismes de raisonnement. Différents modes de représentation ont été décrit, l'accent à été mis notamment sur les règles de production et la représentation par objet.

Chapitre 4

APPROCHE

EDES : Expert

*Estimation des Dommages d'Éléments de Structure
en béton armé*

4-1 Présentation sommaire de EDES : Expert

Le système expert développé se présente sous la forme de cinq (5) modules avec une étape préliminaire présentée au début de la consultation comme indiqué sur la figure 4-1.

Comme indiqué par l'organigramme de la figure 4-1, le système débute par une phase préliminaire qui consiste à saisir des informations au regard d'une fiche client mise à la disposition de l'utilisateur (où figure le nom de l'organisme demandeur de l'expertise, le nom de la personne rencontrée, sa fonction, adresse, téléphone, fax ...etc.), elle renferme également une identification de la construction (à savoir : secteur, zone, adresse, construction calculée au séisme, construction contrôlée ...etc.) voir *annexe 3 interface 2*.

Une description sommaire de la construction est également fournie à savoir age (avant 80, après 80, inconnu), le système structural ou système constructif (portique autostable avec remplissage en maçonnerie rigide, et portique autostable sans remplissage en maçonnerie rigide), usage de la construction (logement, administratif, scolaire, sportif, hospitalier,...etc.), caractéristiques de la construction (nombre de niveaux, hauteur du niveau, vide sanitaire, infrastructure, éléments extérieurs,...etc.) voir *interface 3* (annexe 3).

Au vu de ces informations, un premier ensemble de règles est activé. Ces règles permettront d'aboutir à des conclusions concernant les performances des systèmes constructifs par rapport à la ductilité et à la rigidité, le comportement de la construction par rapport à l'aspect ductilité, le renforcement des vides sanitaires et autres recommandations.

Le module 1 concerne la saisie des données relatives aux types de dommage développés sur les éléments de structure poutre ou poteau. L'utilisateur introduit les observations visuelles des dommages à travers l'interface 4 et 5 (voir annexe 3).

Le module 2 concerne l'estimation des dommages à travers un deuxième ensemble de règles chargées de donner une évaluation des dommages à l'échelle d'un élément (poutre ou poteau).

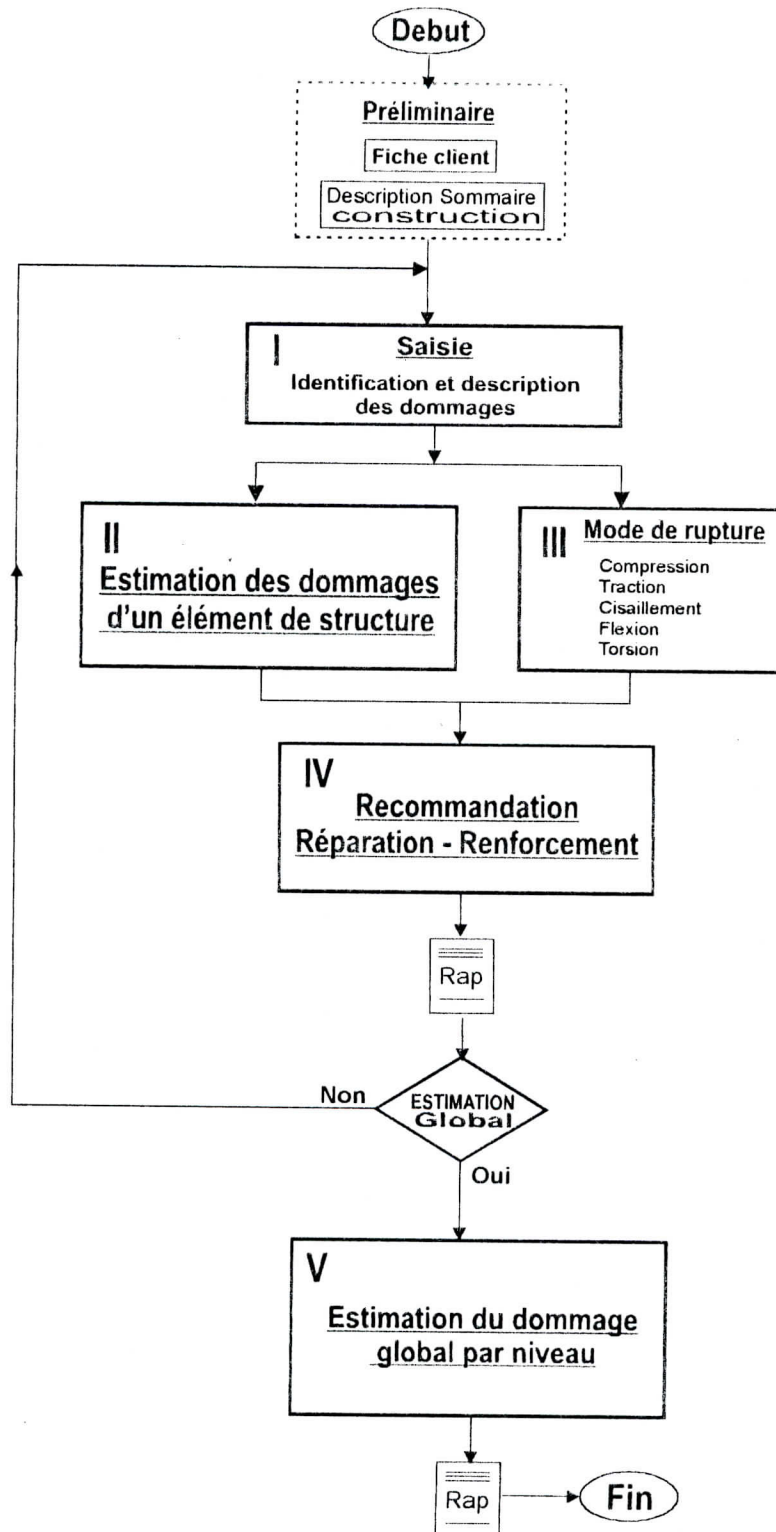


Fig. 4-1 : Organigramme général EDES : Expert

Le module 3 fournit les modes de rupture développés grâce à un troisième ensemble de règles.

Le module 4 apporte les recommandations nécessaires en terme de réparation et ou de renforcement en fonction du degré d'endommagement de l'élément. Ceci est assuré par un quatrième ensemble de règles.

Le module 5 donne une idée globale sur l'endommagement de l'ensemble des poteaux situés à un niveau donné de la construction.

4-2 Consultation de EDES

Le système EDES commence par l'ouverture de la fenêtre de bienvenue qui affiche le logo du système et donne accès aux différentes fonctionnalités du système à travers une série de boutons de sélection. (voir Annexe 3 *Interface 1*).

Lors de la phase préliminaire certains renseignements fournis par l'utilisateur à travers l'interface 2 notamment la fiche client et l'identification de la construction sont facultatifs en ce sens qu'ils ne sont pas utilisés par le système pour aboutir à des conclusions à l'exception de la donnée : construction calculée au séisme et construction contrôlée qui combinée à l'âge de la construction sera utilisée dans une règle qui permettra de juger de l'aspect ductilité. En effet une construction calculée au séisme et contrôlée et située après les années 80 se comportera de manière ductile ; ceci fera l'objet d'une règle.

A travers l'interface 3, l'utilisateur introduit des renseignements concernant le système structural. D'après les RPA 99 [21], pour la catégorie des portiques autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie rigide le remplissage ne gêne pas les déformations des portiques, ce qui confère à ces portiques plus de flexibilité que les portiques autostables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide. Ceci fait l'objet d'une règle.

Pour les portiques autostables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide, les éléments de remplissage peuvent aggraver les phénomènes d'interaction maçonnerie structure, ce qui a pour conséquence l'apparition de fissures dont le système tiendra compte à travers une règle présente dans le module mode de rupture. De plus les portiques

autostables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide sont plus rigides que les portiques autostables en béton armé sans remplissage en maçonnerie rigide, ceci fera l'objet d'une règle.

La présence du vide sanitaire où le remplissage en maçonnerie ne règne pas sur toute la hauteur du poteau, la hauteur de calcul de l'élançement géométrique sera celle de l'ouverture. Il y'a lieu de noter que cette partie du poteau de hauteur h est considéré comme poteau court si $\lambda_g < 5a$ ($\lambda_g = h/a$). Les poteaux courts de manière générale amènent à de graves désordres à l'occasion de séisme, même modérés. En effet, il arrive souvent qu'en cas de confinement insuffisant des poteaux courts par des armatures transversales ou lors d'une mauvaise appréciation de l'effort tranchant V_u un mode de rupture soit développé, dans ce cas il s'agira d'une rupture par cisaillement de poteaux courts, rupture fragile [21].

Ce phénomène physique fera l'objet d'une règle, qui se déclenche lorsque l'utilisateur valide la présence d'un vide sanitaire, et qui pose la question à l'utilisateur de savoir si le remplissage en maçonnerie règne sur toute la hauteur du poteau. Si ce n'est le cas la règle calcule l'élançement géométrique à partir des caractéristiques géométriques des éléments telles que hauteur, longueur et largeur de la section qui auront été saisis à travers l'interface 4, cette règle qui est présente dans le module 3 donnera le mode de rupture qui est rupture par cisaillement de poteaux court rupture fragile.

Description du module 1 :

Le module 1 concerne l'identification des signes de rupture ou type de dommage d'un élément de structure préalablement choisi par l'utilisateur. Celui ci introduit les observations visuelles des types de dommages comme fissuration, épaufrure, écrasement, déformation et condition sur les armatures. Une observation détaillée de chaque type de dommage comme largeur maximale de fissure, nombre de fissure par unité de surface, localisation de la fissure, modèle de fissure, est fournie par l'utilisateur à travers l'interface 5. Cette interface donne accès à l'estimation des dommages par élément (module 2) et également aux modes de rupture (module3).

Description du module 2 :

Le but de ce module est d'apprécier la sévérité des dommages au niveau d'un élément de structure à partir d'observations visuelles que l'utilisateur introduit dans le module 1.

Comme il est indiqué dans l'organigramme de la figure 4-2, l'estimation de la sévérité du dommage total à l'échelle d'un élément passe par l'estimation des sévérités des différents types de dommages tels que fissuration, épaufrure, écrasement et déformation.

L'estimation de la sévérité de chaque type de dommage comme c'est le cas pour la fissuration passe par l'estimation de certains paramètres liés à la fissure tels que largeur de fissure, densité de fissure (nombre de fissures par unité de surface), profondeur de la fissure, mouvement de la fissure.

Par exemple l'estimation de la sévérité de la largeur de fissure est basée sur un indice $I_{L.Fiss}$ (indice largeur fissure) qui varie de 0 à 5 en fonction de la largeur de la fissure. Chaque valeur de l'indice de la largeur de la fissure est associée à une sévérité par le biais d'un descripteur littéral (aucune, très faible, modéré, sévère et très sévère).

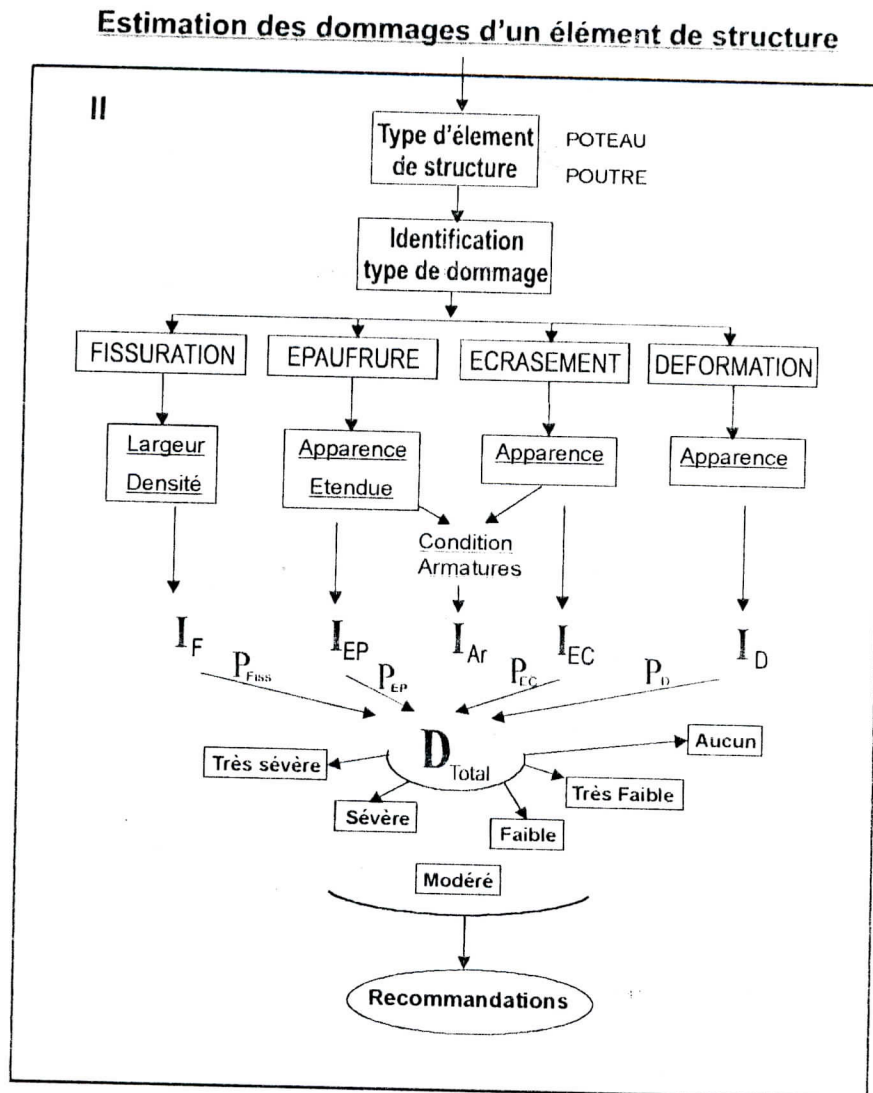
Ainsi comme il est décrit pour le cas de la largeur de fissure des classifications des différents paramètres ou facteurs de rupture tels que densité de fissure, apparence épaufrure, étendue épaufrure, apparence écrasement et apparence déformation (flambement du poteau ou fléchissement de la poutre) sont disponibles dans la littérature notamment à travers des classifications fournies par les règlements Japonais [5] et règlements Américains [6].

Les classifications précédemment cités permettent d'associer un indice révélateur du degré de sévérité en fonction d'une observation visuelle tels que largeur de fissure et densité de fissure. La question qui se pose c'est comment combiner ces deux aspects pour aboutir à un degré d'endommagement par fissuration compte tenue de l'influence de la largeur de fissure et de la densité de fissure. La difficulté qui se pose est l'évaluation du dommage en considérant plusieurs facteurs en même temps.

La méthode analytique d'hierarchisation (AHP) [22], est utilisée dans le cadre de ce travail pour permettre la résolution de ce problème. Cette méthode fournit une analyse

logique et explicite du problème, grâce à une structuration ou hiérarchisation des différents facteurs et un établissement des priorités.

L'utilisation de la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) dans le cadre de notre projet sera décrite ultérieurement (voir les paragraphes 4-3-1 et 4-3-2).



I_F	Indice dommage Fissure
I_{EP}	Indice dommage Epaufrure
I_{EC}	Indice dommage Ecrasement
I_D	Indice dommage Déformation
I_{Ar}	Indice Armature
D	Indice dommage Total
P	Facteur de pondération

Fig. 4-2 : Organigramme d'estimation des dommages d'un élément de structure
(Module II. EDES : Expert)

Description du module 3 :

Le but de ce module est d'identifier les modes de rupture d'un l'élément de structure à partir des observations visuelles introduites par l'utilisateur (module 1).

Les modes de rupture (rupture par cisaillement, par compression, compression combinée au cisaillement, par flexion,...etc.) dépendront du type d'élément à estimer et de la présence des différents signes ou conditions de rupture à savoir :

- Fissuration
- Epaufrure
- Ecrasement
- Déformation

Prenons à titre d'exemple le cas de la fissuration, elle sera identifiée par :

- *Un modèle (fissure inclinée, en X, ou autres)*
- *Une localisation (prés des appuis, au niveau des nœuds poutre / poteau, aux environs du centre de l'élément, à proximité et le long des armatures longitudinales, ou n'importe où le long de la poutre ou sur la hauteur du Poteau).*

Par exemple une fissure en X en tête de poteau avec épaufrure et armatures flambées indiquera un mode de rupture par cisaillement suite à des contraintes alternées, (cas du séisme) combiné à une compression.

Le comportement de l'élément de structure après fissuration dépend principalement de la quantité d'acier. Trois types de ruptures sont considérés :

- Rupture par traction : rupture préventive ou ductile
- Rupture par compression : rupture brusque, non préventive
- Rupture équilibrée ou balancée.

Dans le premier cas, la quantité d'armatures de la section est petite (section sous armée), l'acier atteindra sa limite élastique avant que le béton n'atteigne sa capacité maximum. Un léger chargement additionnel provoque un grand déplacement plastique de la section d'acier à travers des fissures de flexion ayant pour résultat de larges fissures et un grand accroissement de la déformation des fibres extrêmes du béton

comprimé. La capacité maximale de la section sera atteinte lorsque le béton atteindra une déformation de 3,5 ‰. Ce type de rupture est appelé rupture par traction car elle est initiée par l'écoulement de l'acier.

Dans le second cas (cas des sections sur armées), le béton peut atteindre la capacité maximale avant le début de l'écoulement des aciers. La résistance en flexion de la section est atteinte lorsque la déformation de la fibre extrême du béton est de 3,5 ‰, la section se rompt alors soudainement de façon brutale. On parle de rupture brusque non préventive.

Le troisième cas l'acier et le béton atteignent respectivement la limite élastique et la déformation 3,5 ‰ de manière simultanée.

Des règles concernant les différents modes de rupture ont été développées. Quelques unes seront présentées dans le chapitre implémentation (chapitre 5).

Description du module 4 :

Ce module est chargé de préconiser à travers un ensemble de règles des recommandations concernant des mesures d'urgence et des procédures de réparation et de renforcement. Comme il est indiqué sur la figure 4-3 ce module prend comme hypothèse les résultats provenant des modules 2 et 3. Si le niveau de sévérité de l'élément estimé (dans le module 2) est sévère ou très sévère, le module propose des mesures d'urgence concernant l'étaisement de l'élément poutre par étau type industriel et étaisement par profilé métallique ou profilé en bois pour l'élément poteau. Ceci est proposé à travers des règles. Le module propose ensuite par la réparation de la poutre par gainage en béton armé ou la réparation de l'élément poteau par gainage additionné à une injection s'il y a écrasement local du béton aux niveaux des fissures. Cette règle qui prendrait en compte ce type de réparation des zones fissurées utilise dans ces prémisses le résultat de l'estimation du dommage écrasement (module1).

Recommandation
Procédures d'urgence et Réparation - Renforcement

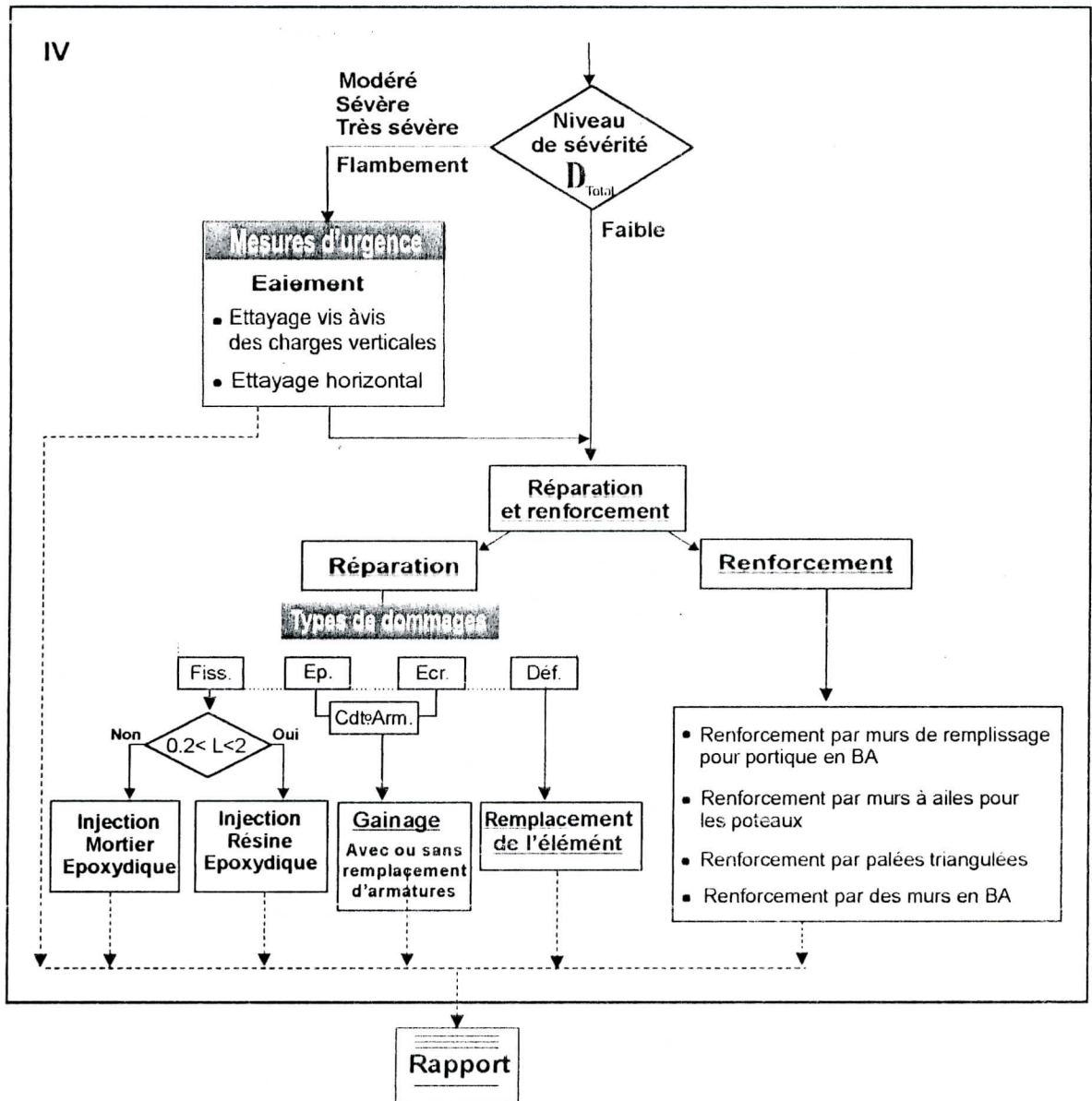


Fig. 4-3 : Organigramme Procédure d'urgence et Réparation-Renforcement
(Module IV EDES : Expert)

Description du module 5 :

Le module 5 par un jeu de règles présentées en annexe 1 donne une estimation globale par niveau. Comme indiqué dans l'organigramme de figure 4-4 après que le système ait estimé l'endommagement de certains éléments (D_i) ou de la totalité des éléments constitutifs d'un niveau donné de la construction, le module 5 les classe au regard de la sévérité de leurs endommagements. Il classe les poteaux selon leur degré de sévérité (très sévère, sévère, modéré, faible, très faible, aucun), puis calcule les proportions de sévérité, et les indices de sévérité pour finalement aboutir à un indice global qui donnera une idée sur la sévérité de l'endommagement du niveau.

Il est important de noter que l'estimation du dommage global par niveau est une évaluation sommaire du degré de dommage enregistré sur un ensemble de poteaux appartenant à un niveau donné, car le système n'a pas tenu compte de la position en plan des poteaux (concentration des poteaux endommagés au centre ou poteaux de rive). Cependant le jugement final de la sévérité global d'un niveau donné de la construction revient à l'ingénieur.

Après les phases estimation, méthodes de restauration, toutes les données du problème (observations visuelles) et toutes les conclusions auxquelles le système a aboutit sont stockées dans un fichier et sont restituées à la demande de l'utilisateur sous forme de rapport.

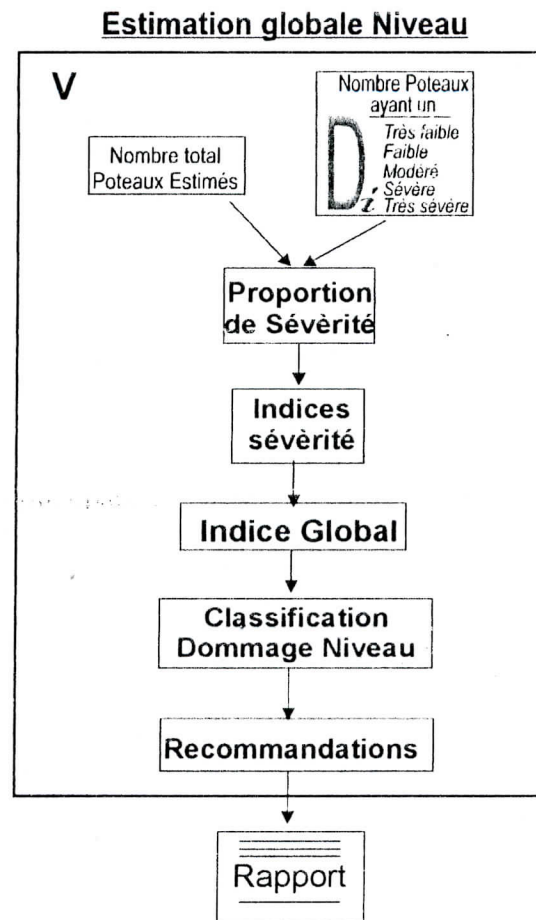


Fig. 4-4 : Organigramme d'estimation globale Niveau
(Module V EDES : Expert)

4-3 Approche d'évaluation des dommages

Après avoir déterminé les modes de rupture de l'élément, la sévérité des dommages est évaluée à partir des suppositions suivantes :

- 1) L'endommagement total dépend du type d'élément estimé : poutre ou poteau
- 2) L'endommagement total dépend de la sévérité des dommages de chaque condition de rupture (fissuration, épaufrure,...etc.) avec une certaine influence de chacune sur l'endommagement total de l'élément.
- 3) La sévérité du dommage de chaque signe de rupture dépend de la sévérité de l'apparence de ce signe de rupture. Différents facteurs d'apparence sont considérés

- (exposition des armatures, avec flambement, largeur de fissure, étendue de fissure, profondeur d'épaufrure et d'écrasement).
- 4) Une échelle de 6 niveaux de sévérité [23] est utilisée pour classer les dommages par introduction d'indices.
 - 5) A chaque niveau de sévérité, ou indice correspond un descripteur littéral (très sévère, sévère, modéré, faible, très faible ou insignifiant)
 - 6) L'état de service, l'état de sécurité, l'esthétique, le coût des réparations, sont autant de critères au regard desquels une estimation de l'endommagement de l'élément se fera. Cependant il est à noter que dans le cadre de ce projet, seul l'état de sécurité a été considéré.

L'évaluation des dommages est basée principalement sur des observations visuelles de l'état post sismique des éléments de structures en béton armé. La méthode (AHP) [22] permet d'exploiter ces informations de manière logique et rationnelle.

4-3-1 La méthode analytique de hiérarchisation (AHP)

La méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) a été développée par THOMAS L.SAATY, un mathématicien nord Américain spécialisé dans la modélisation du processus de prise de décision se rapportant à des problèmes complexes non structurés.

4-3-1-1 Définition

Les décideurs ou chefs d'entreprises sont confrontés quotidiennement à la nécessité de prendre des décisions concernant des problèmes dont les facteurs sont interdépendants et de nature différentes, de telle sorte que l'intuition, et la réflexion s'avèrent généralement insuffisants.

AHP est une méthode qui fournit la possibilité de considérer tous les éléments d'un problème, en le subdivisant en sous problèmes, et ce en faisant appel à des couples de jugement afin de développer une hiérarchie. Des manipulations analytiques sont opérées. Le résultat obtenue est une matrice finale représentant les priorités générales des



alternatives les unes par rapport aux autres. Une décision logique basée sur un arrangement de comparaisons entre les critères et les alternatives est prise.

AHP permet d'établir des comparaisons simples entre les facteurs développées dans la décision. D'où la hiérarchisation de la décision. Elle permet également d'aboutir à la prise d'une décision logique basée sur une méthode analytique, ce qui a pour effet d'éliminer une bonne part du hasard auxquels sont confrontés les décideurs lors du processus de prise de décision. Outre les considérations financières ou autres caractéristiques mesurables qui sont généralement pris en compte dans une décision, AHP permettra à son utilisateur de baser également sa décision sur des caractéristiques aussi bien concrètes qu'abstraites.

En résumé, AHP est une méthode d'aide à la décision dans le cas de problèmes à aspects multiples, tolérant une incertitude acceptable sur les données et les jugements.

C'est une méthode analytique du fait qu'elle est basée sur un raisonnement mathématique et logique permettant l'utilisation de nombres développés par SAATY[22] à travers une échelle représentant l'importance relative des différents aspects d'un problème les uns par rapport aux autres. L'échelle de SAATY sera discutée dans le paragraphe 4-3-2.

C'est une méthode d'hiérarchisation en ce sens qu'elle permet une structuration du processus de prise de décision correspondant à la compréhension du problème.

Pour un complément de définition de la méthode (AHP), un extrait de Saaty [22] est disponible en annexe 6.

4-3-1-2 Différentes étapes de la méthode AHP

La méthode AHP est basée sur les cinq (5) étapes suivantes :

1^{ère} Etape :

Définir complètement le problème et développer une hiérarchie qui aura pour but de représenter précisément le problème en suivant les directives ci-dessous :

Niveau 1- But final ou objectif à atteindre

Niveau 2- Critères utilisés pour juger les alternatives

Niveau 3- Les alternatives

Cette première étape est illustrée par la figure.4-5 du paragraphe (4-3-2) suivant dans le problème de l'estimation des dommages d'un élément de structure en béton armé. Cette

hiérarchie est également illustrée par un exemple concernant l'achat d'une maison et est présentée en annexe 6 (Fig.6-1)

2^{ème} Etape :

Développer les matrices permettant de comparer, d'une part les critères entre eux situés au niveau 2 de la hiérarchie, nommées matrices des critères (voir tableau. 6-1 exemple annexe 6), et d'autre part les alternatives par rapport à chaque critère, situées entre le niveau 2 et le niveau 3 de la hiérarchie et que l'on nomme matrices des alternatives (voir Tableau.6-2 annexe 6), ou matrice de comparaison (voir tableau 4-16) grâce à une échelle d'importance relative allant de 1 à 9, échelle de Saaty (voir paragraphe 4-3-2).

3^{ème} Etape :

Déterminer le poids ou la contribution des priorités de chaque matrice en calculant le déterminant. (facteurs de priorités et facteurs de pondération pour le problème de l'estimation des dommages d'un élément de structure, dans le cas de la fissuration, voir l'équation 2 du paragraphe 4-4 et tableau 4-4 et 4-5).

4^{ème} Etape :

Déterminer les priorités combinées des alternatives de manière linéaire. (voir équation 1 du paragraphe 4-4 ou décision finale concernant l'exemple de l'achat de la maison annexe 6, vecteur de priorité).

5^{ème} Etape :

Calculer le degré de consistance qui déterminera la consistance de la décision et révélera l'éventuelle nécessité de réviser le jugement.

La méthode (AHP) teste la consistance d'un jugement par l'introduction du degré d'inconsistance limité au maximum à 10%. L'exemple traité en annexe 6, montre la valeur de consistance globale de la décision calculée et égale à 0.81, donc inférieure à 10%, ce qui signifie qu'il y'a moins de 8.1% d'inconsistance dans le jugement, ce qui est acceptable.

4-3-1-4 Avantages de la méthode (AHP)

La méthode AHP présente les avantages suivants [30] :

- C'est une méthode analytique permettant de prendre des décisions dans le cas où plusieurs alternatives sont présentes
- C'est une méthode qui offre la possibilité d'éliminer une part importante du hasard dans le processus de la prise de décision
- C'est une méthode qui prend en compte aussi bien les facteurs concrets (mesurables) qu'abstrait d'une décision.
- C'est une méthode qui permet d'utiliser l'intuition et la réflexion de manière logique.

4-3-2 Implémentation de la méthode analytique de hiérarchisation

La méthode d'évaluation des dommages peut être représentée comme une succession d'hiérarchies comme il est indiqué sur la figure 4-5,. Le niveau le plus élevé ou foyer de la hiérarchie est l'évaluation des dommages sur l'élément et qui est l'objectif principal. Le niveau suivant est constitué de plusieurs éléments (état de service, état de sécurité, esthétique, coût des réparations...etc.). Ces éléments représentent les critères à partir desquels on jugera le niveau suivant de la hiérarchie, dans notre cas les signes de ruptures (fissure, épaufrure,...etc.). Le dernier niveau ou le niveau inférieur montre un ensemble de facteurs de rupture (largeur fissure, densité de fissure, profondeur épaufrure, étendue épaufrure, armatures apparentes, armatures flambées,...etc.) qui affectent les signes de rupture.

Après avoir identifié les facteurs (largeur fissure, densité de fissure, profondeur épaufrure, étendue épaufrure, armatures apparentes, armatures flambées,...etc.) qui influencent les résultats de l'évaluation des dommages sur l'élément, il y'a lieu d'asseoir un procédé qui permettrait de dire parmi ces facteurs lesquels sont dominants et lesquels sont insignifiants. Cela est établi en parcourant la hiérarchie et en mettant en place des priorités pour les éléments à chaque niveau.

La première étape dans l'établissement des priorités des éléments, c'est de réaliser des comparaisons. Il s'agit de comparer des éléments par paires par rapport à un critère donné.

Pour ce type de comparaison la forme matricielle est appropriée, elle sera illustré dans le paragraphe suivant (paragraphe 4-5).

Pour remplir la matrice à partir des comparaisons une échelle de nombres allant de 1 à 9 est utilisée pour représenter l'importance relative d'un élément par rapport à un autre en respectant un certain attribut ou critère ou propriété.

Les valeurs de 1 à 9 sont assignées par des experts du domaine de l'évaluation des dommages post-sismiques. Ces valeurs représentent une estimation ou un jugement concernant la comparaison d'une paire d'éléments (i, j) similaires à chaque niveau de la hiérarchie en respectant le critère du niveau supérieur.

D'après le procédé AHP [22], les valeurs de 1 à 9 sont définies comme suit :

- 1 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément i par rapport à celle de l'élément j est *la même*, autrement dit i et j ont même importance.
- 3 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément i par rapport à celle de l'élément j est *faible à modérée*, en d'autre termes, l'expérience et le jugement suggère une légère préférence de l'un par rapport à l'autre.
- 5 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément i par rapport à celle de l'élément j est *fondamentale, essentielle ou forte*. Ce qui signifie que l'expérience et le jugement suggère une préférence élevée de l'un par rapport à l'autre.
- 7 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément i par rapport à celle de l'élément j est *fortement favorisée ou à été démontrée en pratique*.
- 9 : signifie que l'intensité de l'importance de l'élément i par rapport à celle de l'élément j est *absolue*. L'évidence favorisant l'élément i à l'élément j est une affirmation absolue.

2,4,6,8 représentent des degrés d'importance intermédiaires des niveaux précédemment définis. En fait ces valeurs favorisent le compromis.

Réciproquement, lorsque l'élément j est comparé à l'élément i , les valeurs inverses sont assignées. Exemple : Si le degré d'importance du premier élément ($i=1$) d'une hiérarchie par rapport au second ($j=2$) est égal à 3, revient à dire que réciproquement l'intensité d'importance du second élément par rapport au premier est égale à $1/3$.

Le paragraphe suivant illustre l'application de la méthode analytique d'hérarchisation dans l'évaluation des dommages dus à la fissuration.

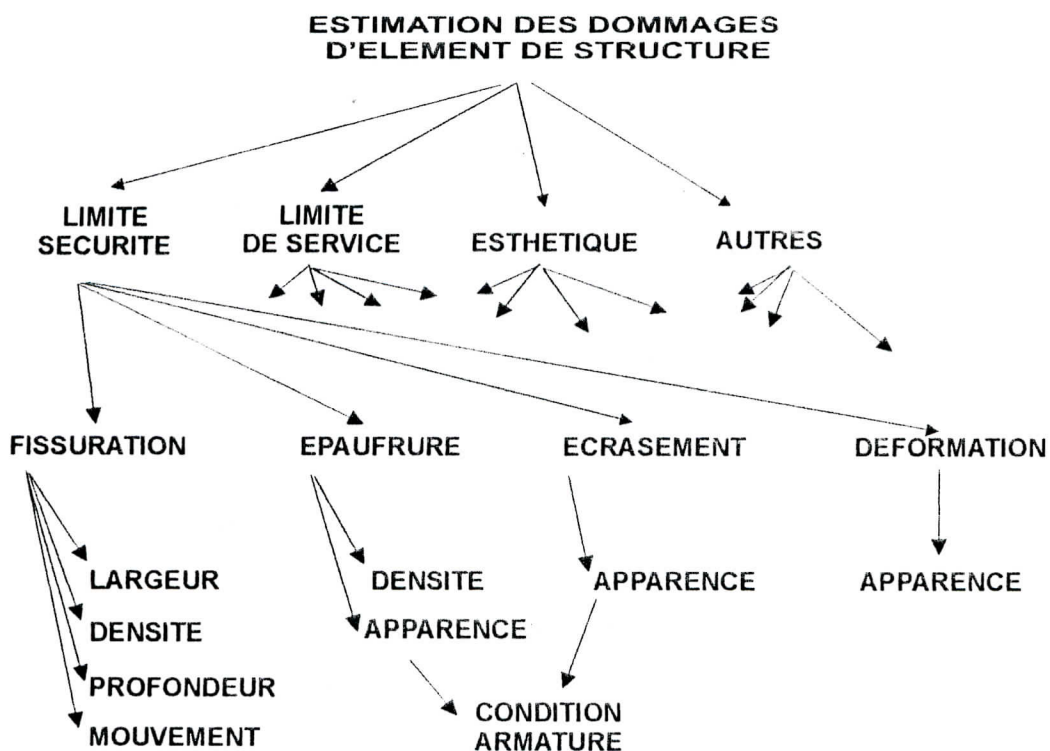


Fig. 4-5 : Niveaux d'hérarchie de EDES Expert

4-4 Evaluation des dommages par fissuration

Quand un élément structural est fissuré, plusieurs facteurs doivent être pris en compte dans l'évaluation de la sévérité de la fissuration. Cela pourrait être la largeur de fissure, l'étendue de fissure, la profondeur de fissure, ou le mouvement de la fissure (fissure active)

comme indiqué sur la figure 4-5. Une fois ces facteurs identifiés, on les classe selon leur influence ou leur priorité relative sur la sévérité de la fissure.

Le tableau 4-1 montre une matrice de comparaison par paires de chaque facteur par rapport à l'influence qu'a chacun d'entre eux sur la fissuration. Lorsqu'on compare un facteur avec lui même, par exemple largeur de fissure avec largeur de fissure, le facteur est égale à 1. Par conséquent la diagonale de la matrice est formée de 1. Lorsqu'on compare un facteur avec un autre, dans ce cas le jugement des experts du domaine de l'évaluation post sismique intervient, il s'agira dans ce cas d'assigner des facteurs de priorités traduisant l'importance relative d'un facteur de fissuration par rapport à l'autre. C'est ce qui sera développé dans ce qui suit (voir tableau 4-4).

Tableau 4-1: Matrice de comparaison par paires de chaque facteur par rapport à l'influence qu'a chacun d'entre eux sur la fissuration

Largeur maximale de fissure observée (mm)	L_F	D_F	Pr_F	M_F
Largeur de fissure	1			
Densité de fissure		1		
Profondeur de fissure			1	
Mouvement de fissure				1

Par soucis de simplification seul les facteurs largeur de fissure et densité de fissure (nombre de fissures par unité de surface) seront considérés. Chaque facteur est exprimé sous forme d'indice auquel est associé une sévérité, ces deux indices sont pondérés puis combinés pour donner l'indice de fissuration.

L'indice de dommage peut être calculé par la formule suivante :

$$I_{Fiss} = P_{Lf} \cdot I_{Lf} + P_{df} \cdot I_{df} \quad (1)$$

Où :

I_{Fiss} : indice dommage fissure exprimant la sévérité du dommage de fissuration (voir tableau 4-6)

I_{Lf} : indice largeur fissure donné par le tableau 4-2

I_{df} : indice densité de fissure donné par le tableau 4-3

P_i : facteur de pondération de chaque de rupture définie par :

$$P_i = \frac{p_i}{\sum_i p_i} \quad (2)$$

Avec p_i : facteur de priorité ou d'importance évalués par les experts [23] à travers la méthode analytique de hiérarchisation. La pondération reflète le degré d'importance de chaque facteur de fissuration.

Remarque : Les facteurs de priorités P_i seront expliqués en détails dans le tableau 4.4

Le tableau 4-2 illustre différentes largeurs de fissures avec un indice et une sévérité correspondante. Au moment de l'estimation d'un élément de structure, il faudra relever la valeur de la largeur de fissure maximale observée à la surface de l'élément, puis on la compare aux valeurs du tableau.

Tableau 4-2: Indice & Sévérité des dommages de largeur de fissure [5]

Largeur maximale de fissure observée (mm)	Indice $I_{L,f}$	Sévérité
Pas de fissuration	0	Aucune
Largeur $\leq 0,2$	1	Faible
$0,2 < \text{Largeur} \leq 1$	2,5	Modérée
$1,0 < \text{Largeur} \leq 2,0$	4	Sévère
$2,0 < \text{Largeur}$	5	Très sévère

Plus la largeur de fissure augmente et plus la sévérité augmente également, car il y'a un risque de corrosion des aciers, surtout dans le cas des fissures traversantes.

Le tableau 4-3 montre les intervalles de densité de fissures possible observée à la surface de l'élément, ainsi que leurs indices et description de sévérité associée. Plus la densité de fissure augmente, plus sa sévérité augmente, et plus le potentiel corrosion des barres d'acier croit.

Tableau 4-3 : Indice & Sévérité des dommages de densité de fissure [6]

Densité de fissure (%)	Indice I_{Dr}	Sévérité
Pas de fissuration	0	Aucune
Densité < 10%	1	Rare
11% < Densité < 25%	2	Intermittente
26% < Densité < 50%	3	Etendue
51% < Densité < 80	4	Fréquent
81% < Densité	5	Partout

Pour déterminer les facteurs d'importances des fissures (p_i) les hypothèses suivantes sont établies :

- 1- Quand la largeur de la fissure est évaluée comme « très sévère » son influence sur l'endommagement total par fissuration est maximale ou absolue, sans tenir compte de la densité de fissures.
- 2- La sévérité de la densité de fissure l'emporte dans le cas où la largeur de fissure est évaluée comme « faible ».
- 3- Dans les cas de figure restant on applique la méthode analytique d'hierarchisation.
- 4- Les facteurs d'importance p_i sont indépendants de l'élément de structure considéré.

Les valeurs du tableau 4-4 sont estimées en considérant la contribution relative de la largeur de fissure et de la densité de fissure à l'endommagement par fissuration. Cette estimation est basée principalement sur un jugement d'experts dans le domaine de l'étude du comportement mécanique d'éléments en béton fissuré .

Dans le cadre de ce projet les valeurs considérées ont été extraites des travaux de [Melchor, Ferregut] [23]. Les valeurs désignées ont été validées par les experts du CTC et CGS.

Tableau 4-4: Facteur de priorité entre (Largeur / Densité) de fissure

Influence du Dommage	Largeur	Densité
Largeur de fissure	1	4
Densité de fissure	1/4	1

Ainsi, il est considéré dans ce travail, selon une échelle de valeurs allant de 1 à 9 (Echelle d'importance relative de Saaty[22]) que l'influence de la largeur de fissure est quatre fois plus importante que celle de la densité de fissure sur l'endommagement de l'élément par fissuration, et réciproquement, l'influence de la densité de fissure correspond au quart de l'influence de la largeur de fissure.

Le tableau 4-5 montre les facteurs d'importance et de pondération finaux compte tenu des hypothèses précédemment énoncées.

Tableau 4-5 : Facteur de priorité & Facteur de pondération

Cas	p_{Lf}	p_{df}	P_{Lf}	P_{df}
1	1	0	1	0
2	0	1	0	1
3	4	1	4/5	1/5

Cas 1 : Estimation des dommages largeur de fissure est « Très sévère »

Cas 2 : Estimation des dommages largeur de fissure est « Faible »

Cas 3 : Estimation des dommages largeur de fissure est « Modéré » ou « Sévère »

P_{Lf} Facteur de pondération largeur de fissure

P_{df} Facteur de pondération densité de fissure

p_{Lf} Facteur de priorité largeur de fissure

p_{df} Facteur de priorité densité de fissure

Ces facteurs, et les valeurs des indices respectifs de largeur de fissure et densité de fissure sont injectées dans l'équation 1, pour calculer la valeur de l'indice fissure.

Le tableau 4-6 récapitule les valeurs des indices de fissure et leur sévérité associée.

Tableau 4-6 : Indice & Sévérité des dommages de fissuration

Indice de Fissuration I_{Fiss}	Sévérité
0	Aucune
$0 < \text{Indice fissuration} \leq 1,5$	Très faible
$1,5 < \text{Indice fissuration} \leq 2,5$	Faible
$2,5 < \text{Indice fissuration} \leq 3,5$	Modéré
$3,5 < \text{Indice fissuration} \leq 4,5$	Sévère
$4,5 < \text{Indice fissuration}$	Très sévère

4-5 Evaluation des dommages par épaufrure

L'évaluation de l'épaufrure d'un élément de structure tient compte de deux paramètres :

- 1) apparence de l'épaufrure
- 2) étendue de l'épaufrure (sans tenir compte du changement éventuel de son apparence à la surface de l'élément).

Pour l'estimation du degré de sévérité de l'épaufrure, on procédera de la même manière que pour le cas de fissure. Chaque facteur est exprimé en terme d'indice, ces deux facteurs sont ensuite pondérés et combinés pour déduire un indice final d'épaufrure.

L'équation 3 permet le calcul de l'indice d'épaufrure compte tenu des indices d'apparence d'épaufrure, d'étendue d'épaufrure, et des facteurs de pondération décrivant de manière quantitative l'influence qu'a chaque facteur d'épaufrure sur l'endommagement par épaufrure.

$$I_{Ep} = P_{AEp} \cdot I_{AEp} + P_{EEp} \cdot I_{EEp} \quad (3)$$

Où :

I_{Ep} : indice dommage Epaufrure

I_{AEp} : indice Apparence d'Epaufrure

I_{EEp} : indice Etendue d'Epaufrure

P_i : facteur de pondération de chaque signe de rupture comme défini en équation 2

Le tableau 4-7 décrit l'apparence de l'épaufrure observée avec un indice associé. La sévérité de l'apparence épaufrure augmente avec la profondeur de l'épaufrure. Plus l'épaufrure est profonde et moins la section est résistance, et plus il y'a risque de perte d'enrobage des barres d'acier, ce qui a pour effet d'augmenter leur potentiel corrosion.

Tableau 4-7: Indice des dommages d'apparence Epaufrure [6]

Apparence d'Epaufrure observée	Indice I_{AEP}
Pas d'épaufrure	0
A peine perceptible	1
Visible	2
Plus profond que 25mm sans exposition d'armature	3
Profondeur 40mm ou l'exposition d'armature est à peine observée	4
Très profond	5

Le tableau 4-8, décrit les intervalles de l'étendue de la surface d'épaufrure (sans tenir compte des changements de l'apparence) ainsi que leurs indices respectifs et leur sévérité associée.

Tableau 4-8 : Indice & Sévérité des dommages de l'Etendue d'Epaufrure [6]

Etendue d'Epaufrure (%)	Indice I_{EEP}	Sévérité
Pas d'épaufrure	0	Aucune
Etendue ≤ 5 %	1	Faible
6 % \leq Etendue ≤ 25 %	2	Modéré
26 % \leq Etendue ≤ 50 %	3	Considérable
51 % \leq Etendue	4	Excessive

Plus la surface d'épaufrure est importante et plus la sévérité croit impliquant un risque de corrosion des armatures qui va en augmentant.

La procédure de détermination de l'indice épaufrure est similaire à celle de la fissuration. Il faudra par conséquent estimer l'influence de l'apparence de l'épaufrure et son étendue sur l'épaufrure elle-même. Ceci se fera compte tenu des hypothèses suivantes :

- 1) Quand l'apparence de l'épaufrure est estimée comme « très sévère », l'influence de l'apparence épaufrure est maximale ou absolue, quelque soit la valeur de l'étendue d'épaufrure.
- 2) Quand l'apparence épaufrure est estimée comme « modérée ou sévère » son influence sur l'endommagement global est plus importante que celle de l'étendue surtout que le risque de corrosion locale des aciers augmente car il y'a perte d'enrobage partielle ou totale. Dans ce cas on applique également la méthode AHP.
- 3) Quand l'apparence épaufrure est estimée comme « faible ou très faible », son influence sur l'endommagement global par épaufrure est égale à celle de l'étendue d'épaufrure. Dans ce cas l'enrobage est présent, et le potentiel corrosion des aciers augmente avec l'étendue d'épaufrure.
- 4) Les facteurs de priorité sont indépendants de l'élément structural considéré.

Dans le cas 3, les valeurs des facteurs de priorité sont implicitement égales à 1. Lorsque l'apparence épaufrure est estimée comme modérée ou sévère, la contribution de l'apparence épaufrure par rapport à l'étendue d'épaufrure sur l'endommagement par épaufrure procède des mêmes considérations que celles de la fissuration. Les facteurs de priorités pour le dommage épaufrure désignés par [Melchor, Ferregut] [23] et validées par les experts du CTC et CGS sont donnés dans le tableau 4-9.

Tableau 4-9 : Facteur de priorité entre (Apparence/Etendue) d'Epaufrure

Influence du Dommage	Apparence	Etendue
Apparence Epaufrure	1	4
Etendue Epaufrure	1/4	1

Le tableau 4-10 récapitule les trois cas précédemment énoncés.

Tableau 4-10 : Facteur de priorité & Facteur de pondération

Cas	P_{AEp}	P_{EEp}	P_{AEp}	P_{EEp}
1	1	0	1	0
2	4	1	4/5	1/5
3	1	1	1/2	1/2

Cas 1 : Apparence épaufrure est estimée « Très sévère »

Cas 2 : Apparence épaufrure est estimée « Modéré » ou « Sévère »

Cas 3 : Apparence épaufrure est estimée « Faible » ou « Faible »

P_{AEp} Facteur de pondération Apparence Epaufrure

P_{EEp} Facteur de pondération Etendue Epaufrure

P_{AEp} Facteur de priorité Apparence Epaufrure

P_{EEp} Facteur de priorité Etendue Epaufrure

Enfin le tableau 4-11 décrit l'endommagement épaufrure grâce aux indices et aux sévérités associées.

Tableau 4-11: Indice & Sévérité des dommages d'épaufrure [6]

Indice d'Epaufrure I_{Ep}	Sévérité
0	Aucune
$0 < \text{Indice Epaufrure} \leq 1,5$	Très faible
$1,5 < \text{Indice Epaufrure} \leq 2,5$	Faible
$2,5 < \text{Indice Epaufrure} \leq 3,5$	Modéré
$3,5 < \text{Indice Epaufrure} \leq 4,5$	Sévère
$4,5 < \text{Indice Epaufrure}$	Très sévère

4-6 Evaluation des dommages par écrasement

L'évaluation de l'écrasement d'un élément de structure se fait en ne tenant compte que d'un seul paramètre à savoir l'apparence. En effet, la rupture par écrasement survient lorsque le béton atteint sa déformation ultime par compression. Le tableau 4-12 illustre l'endommagement par écrasement par le biais d'indices et de critère de sévérité associée. Le niveau d'endommagement le plus bas est considéré comme « modéré », il correspond à un écrasement local de l'enrobage sans épaufrure, c'est donc que les armatures garde leur protection sans risque de corrosion. La sévérité s'accroît à mesure que les armatures perdent leur enrobage, que le béton n'est plus confiné, laissant des évidements entre les armatures transversales, avec possibilité de flambement et de corrosion des armatures longitudinales .

Tableau 4-12 : Indice & Sévérité des dommages d'écrasement [5]

L'apparence observée d'écrasement	Indice I_{Ec}	Sévérité
Pas d'écrasement	0	Aucune
Ecrasement sans épaufrure ou Ecrasement local	3	Modéré
Ecrasement remarquable Avec ou sans Armatures Apparentes	4	Sévère
Perte totale d'enrobage ou armature flambée	5	Très Sévère

4-7 Estimation des conditions d'armatures

L'évaluation des conditions d'armature peuvent s'avérer primordiale pour les recommandations de réparation et de réhabilitation d'élément de structure(exemple remplacement des armatures flambées) sans automatiquement devoir calculer l'indice total d'endommagement compte tenu de toutes les conditions de rupture.

L'estimation des conditions d'armature, relève d'une observation sommaire de l'état des armatures à savoir, le degré d'exposition, l'apparition des armatures suite à une épaufrure ou à un écrasement, l'état de flambement, l'état de corrosion.

Tableau 4-13 : Indice & Sévérité des dommages des conditions d'armatures [23]

Conditions Armatures	Indice I_{Ar}	Sévérité
Epaufrure du béton sans exposition des armatures	0	Aucune (avec potentiel de corrosion)
Armatures apparente non corrodées	4	Potentiellement sévère (avec potentiel de corrosion)
Armatures apparence corrodées ou flambées	5	Très sévère

Le tableau 4-13 illustre bien le fait qu'à mesure que les armatures perdent leur enrobage, le potentiel corrosion augmente, la condition de dommage la plus sévère est développée lorsque les armatures sont apparentes et flambées.

Notons que les conditions des armatures sont indépendantes du type d'élément de structure.

4-8 Estimation de l'endommagement par déformation

Un autre type de dommage considéré est celui du flambement du poteau et du fléchissement de la poutre survenue suite au séisme. Ces états de déformations réduisent considérablement la capacité portante des éléments structuraux .

La déformation dépendra du type d'élément de structure à estimer (poutre ou poteau), et le flambement des poteaux représente à lui seul une condition d'endommagement très sévère, en effet même si la résistance intrinsèque des sections reste constante sous des déformations croissantes, la ruine peut survenir par perte de stabilité ou avec formation d'un mécanisme à rotules plastiques. Ce phénomène résulte de l'accroissement des moments de flexion dû au déplacement latéral sous des sollicitations sismiques : C'est

l'effet P- Δ . On considère également que le fléchissement des poutres devient plus sévère lorsqu'il est visible à l'œil nu.

Tableau 4-14 : Indice & Apparence des dommages du Fléchissement de la poutre [23].

Fléchissement Observé (Poutre Seulement)	Indice I_D
Aucune	0
A peine perceptible	1
Visible	3
Excessive	5

Tableau 4-15 : Indice & Apparence des dommages par Flambement du poteau [23]

Flambement Observé (Poteau Seulement)	Indice I_D
Aucun	0
Visible	5

Les tableaux suivants (4-14 et 4-15) donnent les valeurs des indices pour les poutres et les poteaux.

4-9 Evaluation de l'endommagement total d'un élément de structure

L'estimation de l'endommagement total d'un élément de structure dépend des signes de rupture, tels que fissuration, épaufrure, écrasement et déformation, dont les indices et les sévérités ont été précédemment estimés à partir d'inspections visuelles. Ces indices sont à leur tour pondérés et combinés pour aboutir à un endommagement total ou global de l'élément en respectant la formule suivante :

$$D = P_{Fiss} \cdot I_{Fiss} + P_{Ep} \cdot I_{Ep} + P_{Ec} \cdot I_{Ec} + P_D \cdot I_D \quad (4)$$

Où :

I_{Fiss} : indice dommage Fissure

I_{Ep} : indice dommage Epaufrure

I_{Ec} : indice dommage Ecrasement

I_D : indice dommage Déformation (Fléchissement)

P_i : facteur de pondération de chaque signe de rupture définis par l'équation 2 :

Dans le cas de la détermination de l'indice d'endommagement total D d'une poutre, l'importance relative de la fissuration, l'épaufrure, l'écrasement et la déformation sont pris en compte par la matrice de priorité (tableau 4-16). Ces facteurs de priorités extraits des travaux de [Melchor, Ferregut] [23], représentent la contribution de chaque dommage à l'endommagement total de l'élément poutre en respectant le critère de sécurité. La première colonne de la matrice de priorité décrit l'influence de l'épaufrure, l'écrasement, et la déformation (flèche) par rapport au dommage par fissuration. Les considérations adoptées sont les suivantes [Melchor, Ferregut] [23]:

- L'épaufrure a la même influence que la fissuration sur l'endommagement total de l'élément poutre.
- L'écrasement a une contribution légèrement supérieure à celle de la fissuration à l'endommagement total de l'élément poutre.
- La déformation (flèche) a pratiquement la même influence à faiblement supérieure que la fissuration sur l'endommagement total de l'élément poutre.

Tableau 4-16 : Facteur de priorité des différents types de dommages observés sur un élément poutre (23]

Limite de sécurité	Fiss	Ep	Ec	Déf
Fissuration	1	1	1/3	1/2
Epaufure	1	1	1/3	1/2
Ecrasement	3	3	1	2
Déformation(flèche)	2	2	1/2	1

La même démarche est adoptée pour le cas du poteau. Le tableau (4-17) ou matrice de priorité représente dans le cas de la détermination de l'indice d'endommagement total D d'un poteau, l'importance relative de la fissuration, l'épaufure, et l'écrasement, à l'exception de la déformation (flambement).

Tableau 4-17 : Facteur de priorité des différents types de dommages observés sur un élément poteau [23]

Limite de sécurité	Fiss	Ep	Ec
Fissuration	1	2	1/2
Epaufure	1/2	1	1/3
Ecrasement	2	3	1

La première colonne de la matrice de priorité signifie que :

- l'épaufure a pratiquement la même influence que la fissuration ou légèrement inférieure sur l'endommagement total du poteau.
- l'écrasement a pratiquement la même influence que la fissuration ou légèrement supérieure sur l'endommagement total du poteau.



P_{Fiss} Facteur de priorité de la fissuration
 P_{Ep} Facteur de priorité de l'épaufrure
 P_{Ec} Facteur de priorité de l'écrasement
 P_D Facteur de priorité de la déformation

Tableau 4-19 : Indice total calculé selon la formule 4 et la sévérité associée [23]

Indice de Dommage total D	Sévérité
0	Aucune
$0 < \text{Indice} \leq 1,5$	Très faible
$1,5 < \text{Indice} \leq 2,5$	Faible
$2,5 < \text{Indice} \leq 3,5$	Modéré
$3,5 < \text{Indice} \leq 4,5$	Sévère
$4,5 < \text{Indice}$ fissuration	Très sévère

4-10 Estimation de l'endommagement global d'un niveau

Dans le cas où l'utilisateur du système prévoit de choisir l'estimation globale à partir de l'interface, cela signifierait qu'il voudrait classer un ensemble de poteaux préalablement estimés par le biais des indices et des sévérités calculés (module 2) et appartenant à un niveau donné de la structure selon leur degré de sévérité. Cette classification est menée selon une méthode de classification de l'endommagement des niveaux d'une structure adoptée par des ingénieurs japonais [Ohkubo (1990)] 'Notes for rating floor post earthquake damage' [5], elle nécessite le calcul de proportion de sévérité notée :

$$\text{Proportion Sévérité} = \frac{N_P S_i}{\sum_i N_P S_i} \quad (5)$$

Où :

$N_P S_i$: Nombre de poteaux estimés par degré de sévérité

$\sum N_p S_i$: Nombre total de poteaux estimés par niveau
i : allant de très faible à très sévère

Ces proportions de sévérité sont alors comparées au taux 50%, c'est à dire que si plus de la moitié des poteaux estimés sont par exemple très faiblement endommagés, alors l'indice de sévérité est égal à 5 d'après le tableau 4-20. Si au contraire moins de la moitié des poteaux estimés sont très faiblement endommagés alors d'après le tableau 4-20, la valeur de l'indice de sévérité est égale 10 x la proportion de sévérité. Le calcul est ainsi mené pour chaque degré de sévérité. Ces indices sont à leur tour sommés pour obtenir un indice global qui décrit le degré d'endommagement d'un niveau donné (voir tableau 4-21).

A titre d'exemple, soit le nombre total de poteaux estimés d'un niveau donné de la construction est égal à 10. Sur ces 10 poteaux, 3 sont sévèrement endommagés, 1 est très sévèrement endommagé, et 6 faiblement endommagés. On calcul la proportion de sévérité pour les trois cas :

- Dans le cas de poteaux très sévèrement endommagé, la proportion de sévérité (PS) est égale 1/10, donc inférieure à 0.35, d'où l'indice de sévérité est égale à $1000x (PS)/7$, c'est à dire égal à 14.
- Dans le cas de poteaux sévèrement endommagés, la proportion de sévérité (PS) est égale 3/10, donc inférieure à 0.5, d'où l'indice de sévérité est égale à $100x (PS)$, c'est à dire 30.
- Dans le cas de poteaux faiblement endommagés, la proportion de sévérité (PS) est égale 6/10, donc supérieure à 0.5, d'où l'indice de sévérité est égale à $26x (PS)$, c'est à dire égal à 16.

L'indice de dommage global G est égal à la somme des indices de sévérité de niveau donc égal à $14+30+16= 58$. D'après le tableau 4-21, la sévérité global du niveau est considérée comme très sévère car $50 < G$.

Tableau 4-20 : Indice & Proportion de sévérité par niveau [5]

Proportion Sévérité (Niveau)		Indice de Sévérité
Très faible	< 0,5	[10 * Proportion Sévérité Très faible]
	>= 0,5	5
Faible	< 0,5	[26 * Proportion Sévérité Faible]
	>= 0,5	13
Modéré	< 0,5	[60 * Proportion Sévérité Modérée]
	>= 0,5	30
Sévère	< 0,5	[100 * Proportion Sévérité Sévère]
	>= 0,5	50
Très sévère	< 0,35	[1000 * Proportion Sévérité Très sévère/ 7]
	>= 0,35	50

L'indice des dommages global du niveau peut être calculé par la formule suivante :

$$G = \sum_i (\text{Indice Sévérité})_i \quad (6)$$

Où :

G : indice de dommage global par niveau

(Indice Sévérité)_i : indice de sévérité des proportions de sévérité

A ces indices globaux sont associées des sévérités, voir tableau 4-21

Tableau 4-21: Indice global d'un niveau [5]

Indices global G	Sévérité Globale
0	Aucun
$G < 5$	Très faible
$5 \leq G \leq 10$	Faible
$10 < G < 50$	Modéré
$50 = G$	Sévère
$50 < G$	Très sévère

Il est important de réitérer le fait que l'estimation de l'indice global G n'est qu'indicatif. Cependant, si cette estimation de l'endommagement par niveau avait tenu compte de tous les paramètres (comme de la distribution en plan et en élévation des poteaux endommagés), elle aurait pu être d'une importance capitale dans la prise de décision concernant les réparations. En effet si une construction présente une dizaine de poteaux par exemple au dernier niveau très sévèrement endommagés et des poteaux au RDC très faiblement endommagés, alors cette construction pourra aisément faire l'objet de réparation, il suffira de remplacer les poteaux du dernier niveau. Par contre si cette construction venait à présenter au niveau du RDC deux ou trois poteaux sévèrement à très sévèrement endommagés contre un certain nombre de poteaux endommagés dans les étages supérieurs, il est clair que dans ce cas on ne pourra pas procéder à la réparation, et la construction serait à démolir.

Chapitre 5

IMPLEMENTATION

SYSTEME EXPERT - IMPLEMENTATION

Lors du chapitre 2 précédent nous avons mis en exergue la problématique soulevée par l'évaluation des dommages post-sismique d'élément de structure en béton armé, nous avons montré pourquoi il était plus que nécessaire de développer une approche informatisée qui soit à la fois rapide, fiable, rationnelle et capable d'offrir grâce à l'introduction d'un système expert une formalisation de la connaissance et du savoir des experts humains du domaine du génie sismique.

Le chapitre 3 concernant les systèmes experts ou plus généralement les systèmes à base de connaissances a permis de montrer que les systèmes étant composés principalement d'une base de connaissance, d'un moteur d'inférence et d'interface représentaient en fait des systèmes experts vide tant qu'on ne les avait pas complétés en chargeant leur base de connaissances en vue d'une application particulière ; ou en d'autre terme tant qu'on ne les a pas instanciés ou implémentés. C'est justement l'objet de ce chapitre qui se propose donc de charger la base de connaissance offerte par le système expert vide ou Shell KAPPA-PC version 2.1 avec les connaissances concernant le domaine de l'évaluation des dommages post-sismique et dans la proposition de recommandation se rapportant au renforcement et à la réparation des structures endommagées selon la démarche préalablement établie dans le chapitre 4.

Le KAPPA-PC est un générateur de système à base de connaissances S.B.C qui permet une représentation de la connaissance grâce à des règles de production et à une représentation orientée objet (objet, attributs, valeurs avec variables) utilisant un héritage simple.

Le développement de notre application avec KAPPA-PC nécessite de structurer et de construire la base d'objets, d'écrire les méthodes et les règles, de paramétrer le moteur d'inférence et de développer l'interface utilisateur.

5-1 Représentation de la connaissance

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, la classification des types de dommages tels que fissure, épaufrure, écrasement, déformation et conditions sur les armatures fait intervenir des facteurs tels que apparence épaufrure largeur fissure densité fissure apparence écrasement etc ...

Les types de dommage et leurs facteurs sont structurés selon une arborescence à travers l'utilisation de classes, de sous classes et d'instances faisant intervenir des attributs et leurs valeurs. Le graphe d'héritage dans KAPPA-PC est un arbre. Les informations ou connaissances du domaine sont représentées dans cet arbre comme indiqué sur la figure 5-1.

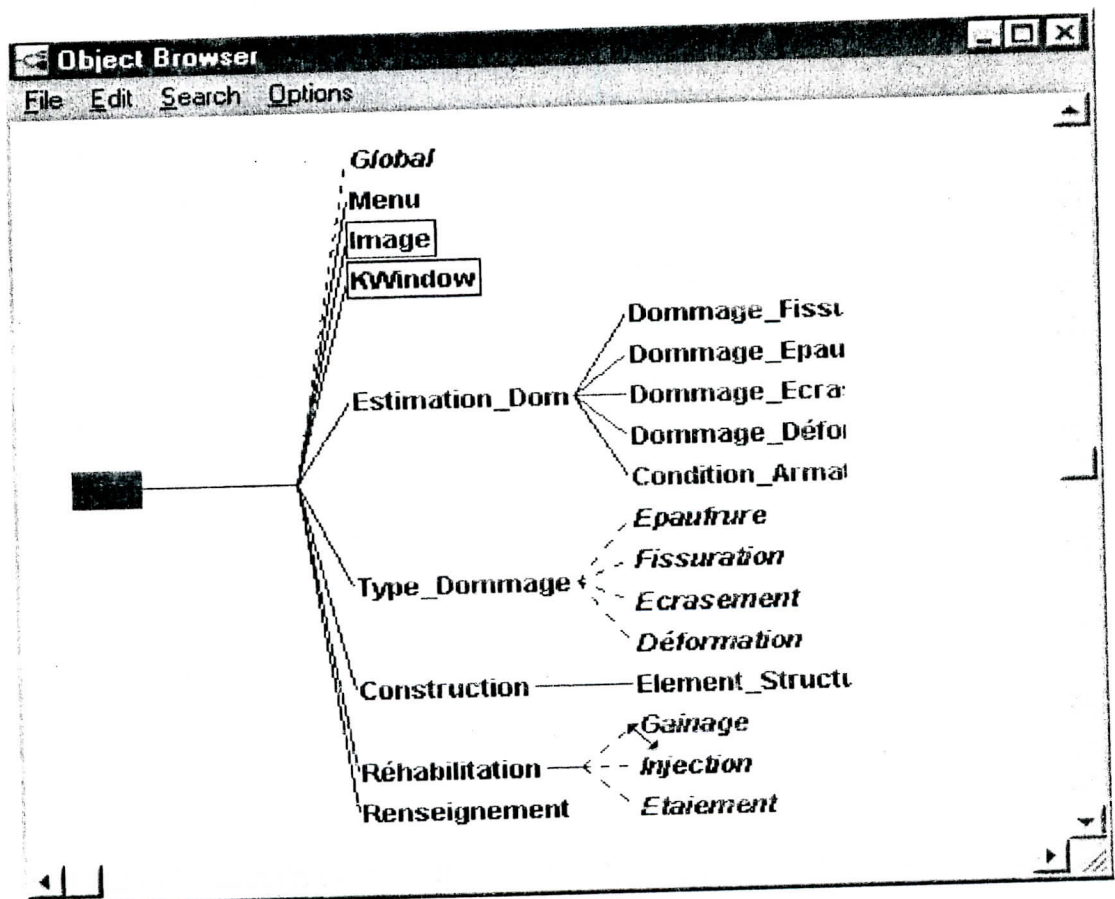


Fig. 5-1 : Arbre objets

La base objet (voir exemple tableau 5-1) a été construite en tenant compte d'un ensemble d'informations concernant la construction telles que système constructif, nombre de poteaux par niveau, hauteur, longueur et section d'éléments structuraux poutres et poteaux etc... Ces renseignements sont saisis à travers l'interface 3 : description construction (voir annexe 3). Des renseignements complémentaires faisant partie de la base objet et concernant l'éventuel client demandeur de l'expertise sont également saisis à travers l'interface 2 : fiche client (voir annexe 3).

Tableau 5-1 : Exemple de la base objet

Classes (Class)	Attributs (Slots)	Valeurs (Values)
Type_Dommage	Domage_Constaté Condition_Armatures	Fissuration, Epaufrure, Ecrasement, Déformation, Aucune, Apeine_apparentes, Apparentes, Corrodées , Flambées
Fissuration	Localisation Modèle Densite-Fissure Largeur_Fissure	Au_centre, Le_long_de_la_portée, Aux_appuis Longitudinal, Transversal, Incliné, TypeX Variable Variable
Domage_Fissuration	Indice_Fissuration Severite_Fissure Sévèrité_LargeurFissure Sévèrité_DensitéFissure Indice_LargeurFissure Indice_DensiteFissure FactPriorité_PoutreFissuré FactPriorité_PoteauFissuré FactPondération_Fissure	Calculer (Méthode) Aucune, Faible, Modéré, Sévère, Très_Sévère Aucune, Faible, Modéré, Sévère, Très_Sévère Aucune, Rare, Intermittante, Etendue, Partout 0, 1 , 2.5 , 4 , 5 0 , 1 , 2 , 3 , 4 , 5 1 1 Calculer Méthode

(suite voir annexe 2)

concernant les éléments de structures, aussi bien celles entrées par l'utilisateur à travers les masques de saisis que celles dérivées par le système expert.

RAPPORT D'ESTIMATION DES DOMMAGES PAR NIVEAU

Inspecteur ID: Date d'inspection

Client Adresse

CONSTRUCTION

Adresse Système structural

Secteur Infrastructure Nombre de Niveaux

Zone Superstructure Hauteur niveau

Usage Elements extérieurs indépendants

ESTIMATION Element de structure

N° Element	Poutre	Poteau	Indice Dommage D	Sévérité	Mode de rupture	Recommandation
Total						

ESTIMATION GLOBAL NIVEAU

N° Niveau

Indice global de niveau **G** =

Sévérité Global de niveau

Degrés	Proportion de sévérité	Indice de sévérité
Très Faible		
Faible		
Modéré		
Sévère		
Très sévère		

RECOMMANDATION

Fig. 5-2: Rapport final

Les règles que nous avons développées sous la forme de :

REGLE NUMERO (nom de la règle)

IF	(Conditions)
And/Or	(Conditions)
THEN	(Conclusions)
And	(Conclusions)
Else	(Conclusions)

comprennent:

1. Des règles qui permettent de dériver le mode de rupture développé dans l'élément
2. Des règles qui déterminent la sévérité de chaque signe de rupture présent dans l'élément
3. Des règles qui évaluent l'endommagement total de l'élément
4. Des règles qui déterminent les procédures de réhabilitations que requière chaque élément endommagé.
5. Des règles qui permettent une classification des différents niveaux de l'ouvrage selon leurs degrés d'endommagement.

Quelques exemples de règles

REGLE NUMERO : 10 (*Poteau_rupture_cisaillement*)

IF L'ELEMENT A ESTIMER EST : UN ELEMENT DE STRUCTURE
And L'ELEMENT DE STRUCTURE EST : UN POTEAU
And [INDICE FISSURE] > 0
And [MODELE FISSURE] = TYPE X
And [LOCALISATION FISSURE] = AUX APPUIS

THEN [MODE RUPTURE] = " CISAILLEMENT DEVELOPPE PAR EFFORT TRANCHANT"

Réf : Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages CGS

Nous devons noter que l'ampleur de la connaissance présentée lors d'une expertise, et la diversité des renseignements fournis par la fiche d'évaluation des dommages post-sismique voir annexe 3 font qu'hormis les données se rapportant aux éléments structuraux spécifiques poutres et poteaux, ainsi qu'aux dommages dont ils font l'objet, les autres renseignements demeurent facultatifs et ne font l'objet, dans le cadre de notre travail, d'aucun développement de règles ni de méthodes.

A l'inverse la base objet concernant les types de dommage ainsi que les observations visuelles qui s'y rattachent tels que fissuration, épaufrure, écrasement, déformation et conditions sur les armatures font l'objet d'un développement d'un grand nombre de règles.

Les informations se rapportant à la description des dommages sont saisies à travers les interfaces 4 et 5. L'utilisateur introduit les observations visuelles concernant les types de dommages constatés. Ces informations sont utilisées dans la base de règles dans la partie prémisses ou conditions (voir section 3-6-4). Les règles déclenchées par chaînage avant aboutissent à des conclusions qui permettent d'établir d'une part un diagnostic pour l'évaluation du niveau d'endommagement des éléments de structures et leurs sévérités associées, et d'autre part les modes de ruptures développés au sein de ces éléments.

Ce diagnostic restitue un indice d'endommagement à l'échelle de l'élément. A cet indice total D est associé un niveau de sévérité. Grâce à un autre jeu de règle faisant intervenir les techniques de réparations et de renforcement des recommandations seront offertes par le système. Diagnostic et recommandation pour un élément de structure soit poutre ou poteau sont présentés dans l'interface 6.

Une boucle est menée sur l'ensemble des éléments structuraux appartenant à un niveau donné. Un indice global G auquel est associé une sévérité d'endommagement de niveau ainsi que des recommandations globales portant sur des éventuelles procédures d'urgences telles que étayages, renforcement, réparations du niveau, ou le cas échéant démolition, sont restituées à travers un rapport d'estimation des dommages par niveau (voir figure 5-2). Dans ce rapport final sont consignées toutes les informations

Cette règle permet de dériver le mode de rupture qui est le cisaillement de poteaux développé par efforts tranchants à partir de l'observation du modèle de fissure en croix (X) en tête et pied de poteaux.

La règle numéro 11 permet de donner le mode la rupture d'un poteau par cisaillement excessif par effet de poteau court, et création de rotule plastique avec apparition et flambement d'armatures longitudinales. Ce type de rupture met en évidence l'effet qu'à la réduction de l'élanement du poteau sur la diminution de sa ductilité et donc sur sa capacité à dissiper l'énergie

REGLE NUMERO : 75 (Rupture_effet_poteau_court)

IF L'ELEMENT A ESTIMER EST : UN ELEMENT DE STRUCTURE
And L'ELEMENT DE STRUCTURE EST : UN POTEAU
And [INDICE ECRASEMENT] > 0
And [INDICE EPAUFRURE] > 0
And [LOCALISATION ECRASEMENT] = AUX APPUIS
And [CONDITION ARMATURE] = APPARENTES
And [CONDITION ARMATURE] = FLAMBEES
And [ELANCEMENT GEOMETRIQUE] < 5

THEN [MODE RUPTURE] = “ ROTULE PLASTIQUE SUR POTEAU COURT”
And [MODE RUPTURE] = “ CISAILLEMENT EXCESSIF PAR EFFET POTEAU COURT”
And [MODE RUPTURE] = “ INSUFFISANCE DES CADRES TRANSVERSAUX ”
And [MODE RUPTURE] = “ DUCTILITE FAIBLE”

Réf: CTC Ouest Journée technique sur le séisme de Ain-Temouchent 22-12-1999 (M^{me} Abdelmoumene)

REGLE NUMERO : 78 (Poutre rotule plastique)

IF L'ELEMENT A ESTIMER EST : UN ELEMENT DE STRUCTURE
And L'ELEMENT DE STRUCTURE EST : UNE POUTRE
And [INDICE EPAUFRURE] > 0
And [INDICE ECRASEMENT] > 0
And [LOCALISATION ECRASEMENT] = AUX APPUIS
And [CONDITION ARMATURE] = APPARENTES

THEN [MODE RUPTURE] = “ ROTULE PLASTIQUE DUE AUX EFFETS DE L'ALTERNANCE DE L'EFFORT NORMAL ET DU MOMENT DE FLEXION”

La règle numéro 18 signifie qu'il y a rotule plastique au niveau de la poutre dans la zone nodale ou l'on constate une zone d'écrasement et d'éclatement du béton (épaufreure) avec ou sans flambement des armatures dues aux effets de l'alternance de l'effort normal et du moment de flexion.

REGLE NUMERO : 80 (Poutre_Fissure incliné)

IF L'ELEMENT A ESTIMER EST : UN ELEMENT DE STRUCTURE
And L'ELEMENT DE STRUCTURE EST : UNE POUTRE
And [INDICE FISSURE] > 0
And [MODELE FISSURE] = INCLINEE
And [LOCALISATION FISSURE] = AUX APPUIS

THEN [MODE RUPTURE] = " FISSURES INCLINEES DUES AUX EFFETS DE L'EFFORT TRANCHANT "

le mode de rupture dérivé dans la règle 20 est fissures inclinées dues aux effets de l'effort tranchant.

REGLE NUMERO : 5 (Indice Largeur Fissure5)

IF L'ELEMENT A ESTIMER EST : UN ELEMENT DE STRUCTURE
And L'ELEMENT DE STRUCTURE EST : UNE POUTRE
Or L'ELEMENT DE STRUCTURE EST : UN POTEAU
And [LARGEUR FISSURE] > 2.0

THEN [INDICE LARGEUR FISSURE] = 5
And [SEVERITE LARGEUR FISSURE] = TRES SEVERE

La règle 5 donne une estimation du facteur largeur de fissure dont l'indice est égal à 5 et considérée comme très sévère à partir de l'observation de la largeur de fissure qui dépasse 2 mm.

La règle 63 permet d'estimer l'endommagement de l'élément poutre à travers le calcul d'un indice total D qui tient compte de la participation de chaque type de dommage moyennant son facteur de priorité. De même la règle numéro 64 calcule l'indice d'endommagement total d'un poteau lorsque les signes de rupture tels que fissure, épaufrure, écrasement sont présents. Les indices relatifs à chaque signe de rupture sont pondérés puis combinés afin de calculer l'indice D. Le flambement du poteau est représenté par un indice de déformation égal à 5.

REGLE NUMERO : 64 (*Indice_DommageTotal Poteau*)

IF L'ELEMENT A ESTIMER EST : UN ELEMENT DE STRUCTURE
And L'ELEMENT DE STRUCTURE EST : UN POTEAU
And [INDICE FISSURATION] > 0
And [INDICE EPAUFRURE] > 0
And [INDICE ECRASEMENT] > 0
And [INDICE FLAMBEMENT POTEAU] > 0

THEN [INDICE DOMMAGE TOTAL] =
 (([FACTEUR PRIORITE FISSURE POTEAU]*[INDICE FISSURATION]) +
 ([FACTEUR PRIORITE EPAUFRURE POTEAU]*[INDICE EPAUFRURE]) +
 ([FACTEUR PRIORITE ECRASEMENT POTEAU]*[INDICE
 ECRASEMENT])) / ([FACTEUR PRIORITE FISSURE POTEAU] +
 [FACTEUR PRIORITE EPAUFRURE POTEAU] + [FACTEUR PRIORITE
 ECRASEMENT POTEAU])
And [INDICE FLAMBEMENT POTEAU] = 5

REGLE NUMERO : 88 (*Réparation Poteau _ Gainage métallique et Injection*)

IF L'ELEMENT A ESTIMER EST : UN ELEMENT DE STRUCTURE
And L'ELEMENT DE STRUCTURE EST : UN POTEAU
And [SEVERITE FISSURE] = MODERE
Or [SEVERITE FISSURE] = SEVERE
Or [SEVERITE FISSURE] = TRES SEVERE
And [SEVERITE ECRASEMENT] = MODEREE

THEN [RECOMMANDATIONS] = REPARATION POTEAU
And [REPARATION POTEAU] = "GAINAGE METALLIQUE AVEC
 INJECTION DE RESINE EPOXYDIQUE DANS LES FISSURE"

La règle 88 recommande l'utilisation d'un gainage métallique avec injection de résine à faible viscosité dans les fissures dans le cas de poteaux présentant des écrasements locaux du béton au niveau des fissures.

REGLE NUMERO : 95 (Sévérité globale niveau 6)

IF L'ELEMENT A ESTIMER EST : PLANCHER GLOBAL

And [INDICE DOMMAGE GLOBAL PLANCHER] > 50

THEN [SEVERITE GLOBAL PLANCHER] = TRES SEVERE

And [RECOMMANDATION] = " RENFORCEMENT PAR ETAYAGE EN BOIS
OU PAR PROFILES METALLIQUE DE TOUT LES POTEAU
ENDOMMAGES DU NIVEAU – DEMOLITION ”

La règle 95 recommande la nécessité de recourir provisoirement à un étayage (en bois ou métallique) d'un plancher donné de l'ouvrage lorsque celui-ci présente un niveau d'endommagement global très sévère en vue d'une future démolition.

Chapitre 6

**CONCLUSION
&
RECOMMANDATIONS**

CONCLUSION & RECOMMANDATIONS

Le résultat de notre travail s'est soldé par l'élaboration d'un système expert prototype pour l'estimation des dommages post-sismiques d'éléments de structure en béton armée.

Ce système peut être utilisé comme un outil d'aide à la décision, capable d'assister les ingénieurs en génie-civil qui ne sont pas nécessairement experts dans le domaine de l'évaluation des dégâts occasionnés aux structures suite à un séisme. Ce système expert aide les ingénieurs dans leur tâche qui consiste à :

- Identifier par observation visuelle les types de dommages ou signes de ruptures développés sur les éléments poutres et poteaux appartenant à un système constructif portique autostable.
- Identifier les modes de ruptures principaux développés dans les poutres et poteaux.
- Estimer le niveau de dommage de chaque signe de rupture présent sur l'élément structural, par le biais d'indices (indice fissure, indice épaufrure, indice écrasement, indice déformation) pour finalement estimer le niveau de dommage total de l'élément par le biais d'un indice total D, combinaison des indices précédemment cités.
- Suggérer des mesures à prendre, permettant de conférer à l'élément endommagé un niveau de sécurité acceptable. Ces mesures d'étayage, de renforcement et ou de réparation sont fonction du degré d'endommagement de l'élément.
- Donner une classification des différents niveaux (planchers) de la construction en fonction de leur degré d'endommagement et proposer des

recommandations générales concernant l'évacuation partielle ou totale des occupants pour confortement ou démolition de l'ouvrage

Le système n'impose aucunement ses solutions à l'ingénieur il apporte simplement des éléments d'évaluation et des recommandations qui seront par la suite laissés à l'appréciation de ce dernier. Il est clair que la décision finale revient à l'ingénieur.

Le système EDES : Expert acronyme de l'Estimation des Dommages des Eléments de structure à été développé à l'aide d'un système expert vide (Shell) KAPPA-PC, avec une base objet et une base de règles, représentation de la connaissance que l'on a acquis d'une part à travers les différents interviews et entretiens accordés par des ingénieurs experts dans le domaine du contrôle technique des constructions (CTC) et du génie sismique (CGS), et d'autre part à partir d'une littérature qui a englobé des méthodes d'estimation de dommages post-sismiques et des techniques de réparation des ouvrages utilisées en Algérie, au Japon et en Amérique.

L'approche qui a été développée dans le système expert est basé sur une méthode analytique de hiérarchisation qui offre une grande similitude avec le processus de raisonnement de l'homme. Cette méthode permet de considérer le problème de l'estimation des dégâts comme un tout et prend en compte la contribution simultanée des différents types de dommages et leurs influences les uns par rapport aux autres sur l'endommagement total de l'élément.

Le système développé est en fait à ses débuts. Notre travail peut être considéré comme une initiation au double problème de l'expertise post-sismique d'éléments de structure et à l'introduction d'une méthode informatique représentée par les systèmes experts.

Limitation du système

- Le système développé se limite exclusivement à l'étude des poutres et des poteaux en béton armé appartenant à un système constructif portique autostable avec maçonnerie rigide ou non rigide. Il serait intéressant d'étendre l'estimation des dommages post-sismique à d'autres éléments porteurs tels



que voile en béton armé, murs en maçonnerie également à des éléments de contreventement et des éléments secondaires.

- Lors du développement de l'approche de EDES : Expert, nous avons précisé que l'évaluation des dommages post-sismique des éléments s'est faite en tenant compte du critère de sécurité. Il serait plus intéressant de mener à nouveau cette estimation en tenant compte d'autres critères tels que l'état limite de service, l'esthétique, coût des réparations et autres... puis grâce à la méthode analytique d'hierarchisation asseoir le poids de l'influence ou de la contribution de chaque critère dans l'estimation du dommage d'un élément de structure.
- Il est important de noter également que lors de l'établissement de la base des règles concernant l'estimation des dommages, les modes de ruptures ainsi que les mesures de réhabilitations, on a supposé que celles ci étaient vraies ou sûres à 100%. Hors il est claire que comme, c'est le cas dans le domaine de l'expertise, il n'existe pas d'algorithme général de résolution du problème de l'évaluation. La connaissance rattachée à ce domaine est largement fragmentée et les techniques de résolutions sont fortement liées au savoir faire de l'expert humain ; Aussi il serait plus juste d'introduire dans notre recherche la notion de facteur d'incertitude. Ceci serait possible en affectant les conditions de déclenchement des règles, et les règles elles mêmes de coefficients de vraisemblance et par conséquent les conclusions aux quelles le système aboutit seraient également affectées d'une valeur de vraisemblance. C'est une façon de faire pour appréhender les problèmes qui se posent dans le domaine de l'expertise parce qu'aussi bien les données (observations visuelles) que les inférences (qui reflètent l'expertise) sont généralement incertaines. Un certain nombre de méthodes ont été mises au point pour manipuler les incertitudes associées aux inférences plausibles. La théorie des ensembles flous est une autre façon d'appréhender le problème en prenant en compte non l'incertitude des données, mais leurs imprécisions.

- Une autre amélioration qui faciliterait le dialogue avec l'utilisateur concernerait la présentation éventuelle de croquis et de photos qui seraient fournies à l'utilisateur qui voudrait visualiser un certain type de dommage, de mode de rupture ou de procédé de réparation.
- Ce système pourrait également être enrichi en ce sens que le séisme est souvent révélateur d'erreur de conception et de malfaçon qui sont en plus du séisme des causes principales de désordres relevés sur les éléments.

Enfin toute autre proposition à laquelle nous n'avons pas pensé et qui serait apte à fournir des éléments de réponse et une aide conséquente pour l'évaluation des dommages post-sismique serait des plus appréciée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] *Synthèse des travaux d'expertise & évaluation des dommages*
« Séisme Ain_Temouchent » CTC Ouest 1999
- [2] *Les techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton*,
STRRES , AFPC, FNTP, SNBATI. Juin 1987
- [3] *Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement
des ouvrages*. Document technique réglementaire C.G.S (1992)
- [4] *Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages*.
Document Techniques réglementaire D.T.R – C..G.S (1992)
- [5] *Japanese guidelines for postearthquake damage inspection in Ohkubo 1990*
Seminar in structural Engineering, Department of AMES, University of
California, San Diego.
- [6] ACI 1986, ACI Committee 201.3R-86. Klieger, P.,(1986)
Guide for making a condition survey of concrete in service, American
Concrete Institute, Reported by the ACI Committee 201
- [7] PENEZLIS , KAPPOS. Earthquake resistance concrete structure (1995)
Ed. Eyrolles
- [8] Grünthal. G (1992) *European Macroseismic Scale*
Chairman of the E.S.C working group European Seismological Commission.
Germany. Seismology and seismic hazard assessment. Regional international
training course (1995).
- [9] PAKVOR. A : *“Implemented methodology and procedure for earthquake
damage and useability classification of buildings”* Publication of Kiril and
Metodij University n° 70/3 (1984). Skopje, Yugoslavia
- [10] Hisham. Y. Qasrawi (2000). *Lessons from Izmit Earthquake*
Civil Engineering department, College of Engineering, Al-hashemiyah
University of Jordanie. Extrait du. 2^{ème} colloque nationale de génie-
parasismique du 9, 10 & 11 Octobre 2000 Sheraton - Alger

- [11] Jérôme GENSAL: *Représentation de connaissances par objets, Cours Sciences Cognitives et représentation de connaissances année 2000/2001.* <http://www.hull.ac.uk>
- [12] Henri FARRENY : *Les systèmes experts : principe et Exemples* , CEPADUES Editions, Toulouse (1989)
- [13] Alain BONNET: *L'intelligence artificielle – Promesses & Réalités Inter Editions (1984)*
- [14] BUCHANAN B.G, SUTHERLAND G., FEIGENBAUM E.A.: *Heuristic Dendral : A program for generating explanatory hypotheses in organic chemistry, Mach .Int., Vol. 4, pp. 209-254, (1969)*
- [15] Annie DANZART : *Cours sur les systèmes experts* www.infres.enst.fr/~danzart (1997)
- [16] BUCHANAN B.G.: *New research on expert systems. Machine intelligence Ed. By J.E. Hayes-Roth and D. Michie, Ellis Horwood pp. 269-299. (1982).*
- [17] RACHID BAYAD: *Conception et Réalisation de Serrure: un système interactif d'aide à la décision « intelligent ».* Thèse d'Université – Paris VI Laboratoire forme et intelligence artificielle Institut BLAISE PASCAL.
- [18] MASSINY .L, NILSON N.J. : *Conception orientée objet* Edition Hachette (1989)
- [19] NACHET. N, RAMDANI. SM : *Exposé sur les systèmes experts basé sur les règles de production,* Université d'Oran ES-Senia, mars 1996, 35p.
- [20] MAHER, M. L : *Expert systems in Civil Engineers: Technology and Application.* Edited by the American Society of Civil Engineers (ASCE) pp. 456-465 A.S.C.E. (1987)
- [21] *Règles Parasismique Algériennes RPA 99*
- [22] SAATY, T.L. (1982). *Decision making for leaders. The analytical hierarchy process for decisions in complex world. Lifetime learning publications.*

- [23] O. MELCHOR & FERRIGUT: *Towards an expert system for damage assessment of structural concrete elements*. Artificial Intelligence for Engineering Design n°9 p401-418 (1995)
- [24] CHEN,R.and LIU,X.,"*A knowledge based expert system for damage assessment of reinforced concrete industry buildings (RAISE-2)*", 5ème conference internationale pour la fiabilité et la sécurité des structures, San Fransisco, A.S.C.E (1989).
- [25] YI-CHERNG YEH, DEH-SHIU, YAU-HWAUG KUO.,"*Expert System for Diagnosing Damage of Prestressed Concrete Pile*" Journal of construction engineering and management n°117 p13-26 (1991).
- [26] FURUTA. H., SHIRAISHI. N., YAO. J: "*An expert system for evaluation of structural durability*" Journal of Construction Engineering and Management n°2 pp11-15 (1992).
- [27] RODIS,K.,"*Heuristic, Qualitative, and Quantitative Reasoning About Steel Bridge Fatigue and Fracture*", Thèse de Ph.D.,Massachusetts Institut of Technology, (1988).
- [28] MAY. I.M., ALWANI. M, TIZANI. W.K.: "*The development of an Intelligent Knowledge Based System for the Diagnosis of Causes of Cracking in Buildings*",Proceedings of the first International Conference on Lessons from Structural Failures, Edited by Milos DRDACKY Czechoslovakie, (1991).
- [29] FLEISCHMANN, N. and SCHNELLENBACH,M.: "*Knowledge-based system in structural engineering in Germany*" . Published by the American Society of Civil Engineers (ASCE) ,pp. 558-565 (1992)
- [30] JESUS. E and ARAPE. M: "*The AHP (Analytical Hierarchy Process Technique)*", *Objective of the technique*. Regional Conference on Technology Foresight for Central and Eastern Europe and Newly Independent States.(2000)
<http://www-mmd.eng.cam.ac.uk/people/ahr/dstools/choosing/ahp.htm>

ANNEXE 1

BASE DE CONNAISSANCES (BASE DES REGLES)

BASE DE CONNAISSANCES (BASE DES REGLES)**REGLE NUMERO : 1 (PAS DE FISSURATION)**

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element != Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element != Poteau
And [Largeur_Fissure] != 0
And [Densite_Fissure] != 0

THEN [Indice_LargeurFissure] != 0
And [Indice_DensiteFissure] != 0
And [Indice_Fissure] != 0
And [[Sévérité_Fissure] != AUCUNE
And [FactPriorité_FissPoutre] != 0
And [FactPriorité_FissPoteau] != 0

pas de dégâts de fissures, aussi tous les indices qui se rattachent à la fissure sont nuls

REGLE NUMERO : 2 (Indice Largeur Fissure1)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element != Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element != Poteau
And [Largeur_Fissure] > 0
And [Largeur_Fissure] <= 0.2

THEN [Indice_LargeurFissure] != 1
And [Sévérité_LargeurFissure] != FAIBLE

REGLE NUMERO : 5 (Indice Largeur Fissure5)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element != Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element != Poteau
And [Largeur_Fissure] > 2.0

THEN [Indice_LargeurFissure] != 5
And [Sévérité_LargeurFissure] != TRES SEVERE

REGLE NUMERO : 8 (Indice Densite Fissure 3)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element != Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element != Poteau
And [Densite_Fissure] > 26%
And [Densite_Fissure] <= 50%

THEN [Indice_DensiteFissure] != 3
And [Sévérité_DensiteFissure] != FREQUENT

REGLE NUMERO : 11 (Indice FISSURE 5)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Indice_LargeurFissure] #= 5
And [Indice_DensiteFissure] > 0

THEN [Indice_Fissure] #= [Indice_LargeurFissure]
And [Sévérité_Fissure] #= TRES SEVERE
And [FactPriorité_FissPoutre] #= 1
And [FactPriorité_FissPoteau] #= 1

REGLE NUMERO : 10 (Poteau rupture cisaillement)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And Dommage_Fissuration :Indice_Fissure > 0
And Fissuration :Modèle_Fissure #= TypeX
And Fissuration :Localisation_Fissure #= Aux_appuis

THEN Estimation_Dommage :Mode_Rupture = " CISAILLEMENT DEVELOPPE PAR EFFORT TRANCHANT"

Réf : Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages CGS

REGLE NUMERO : 16 (Indice FISSURE M)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Indice_Fissure] > 2.5
And [Indice_Fissure] <= 3.5

THEN [Sévérité_Fissure] #= MODERE

REGLE NUMERO : 17 (Indice FISSURE S)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Indice_Fissure] > 3.5
And [Indice_Fissure] <= 4.5

THEN [Sévérité_Fissure] #= SEVERE

REGLE NUMERO : 19 (PAS D'EPAUFRURE)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Apparence_Epaufrure] #= AUCUNE
And [Densite_Epaufrure] #= 0

THEN [Indice_ApparenceEpaufrure] #= 0
And [Indice_DensiteEpaufrure] #= 0
And [Indice_Epaufrure] #= 0
And [Sévérité_Epaufrure] #= AUCUNE
And [Indice_ArmatureEpaufrure] #= 0
And [FactPriorité_EpauPoutre] #= 0
And [FactPriorité_EcrasPoteau] #= 0

REGLE NUMERO : 21b (Indice Apparence Epaufrure3)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Apparence_Epaufrure] #= PROFONDEUR PLUS DE 25MM

THEN [Indice_ApparenceEpaufrure] #= 3
And [Sévérité_ApparenceEpaufrure] #= MODEREE
And [Indice_ArmatureEpaufrure] #= 0
And [Sévérité_Armature] #= AUCUNE AVEC POTENTIEL CORROSION

REGLE NUMERO : 22 (Indice Apparence Epaufrure4)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Apparence_Epaufrure] #= PROFONDEUR 40MM
And [Apparence_Armature] #= A PEINE APPARENTE

THEN [Indice_ApparenceEpaufrure] #= 4
And [Sévérité_ApparenceEpaufrure] #= SEVERE
And [Indice_ArmatureEpaufrure] #= 4
And [Sévérité_Armature] #= POTENTIELLEMENT SEVERE

REGLE NUMERO : 23 (Indice Apparence Epaufrure5 AR5)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Apparence_Epaufrure] #= TRES PROFOND
And [Apparence_Armature] #= APPARENTE
And [Apparence_Armature] #= CORRODEES
Or [Apparence_Armature] #= FLAMBEES

THEN [Indice_ApparenceEpaufrure] #= 5
And [Sévérité_ApparenceEpaufrure] #= TRES SEVERE
And [Indice_ArmatureEpaufrure] #= 5
And [Sévérité_Armature] #= TRES SEVERE

REGLE NUMERO : 29 (Indice_DensiteEpaufrure 43 AR4)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Densite_Epaufrure] >= 51%
And [Apparence_Armature] #= APPARENTES
And [Apparence_Armature] #= NON CORRODEES
Or [Apparence_Armature] #= NON FLAMBEES

THEN [Indice_DensiteEpaufrure] #= 4
And [Sévérité_DensiteEpaufrure] #= EXCESSIVE
And [Indice_ArmatureEpaufrure] #= 4
And [Sévérité_Armature] #= POTENTIELLEMENT SEVERE

REGLE NUMERO : 31 (Indice_EpaufrureCas1 POUTRE)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element \neq Poutre
And [Indice_ApparenceEpaufrure] \neq 5
Or [Sévérité_ApparenceEpaufrure] \neq TRES SEVERE

THEN [Indice_Epaufrure] \neq [Indice_ApparenceEpaufrure]
And [Sévérité_Epaufrure] \neq TRES SEVERE
And [FactPriorité_EpauPoutre] \neq 1

REGLE NUMERO : 34 (Indice_EpaufrureCas1 POTEAU)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element \neq Poteau
And [Indice_ApparenceEpaufrure] \neq 5
Or [Sévérité_ApparenceEpaufrure] \neq TRES SEVERE

THEN [Indice_Epaufrure] \neq [Indice_ApparenceEpaufrure]
And [Sévérité_Epaufrure] \neq TRES SEVERE
And [FactPriorité_EpauPoutre] \neq 1/2

REGLE NUMERO : 43 (Indice_Ecrasement 3 Poutre)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element \neq Poutre
And [Apparence_Ecrasement] \neq ECRASEMENT LOCAL
Or [Apparence_Ecrasement] \neq ECRASEMENT SANS EPAUFRURE

THEN [Indice_Ecrasement] \neq 3
And [Indice_ArmatureEcrasement] \neq 0
And [Sévérité_Ecrasement] \neq MODERE
And [Sévérité_Armature] \neq AUCUNE EVEC POTENTIEL DE CORROSION
And [FactPriorité_EpauPoutre] \neq 3

REGLE NUMERO : 47 (Indice_Ecrasement 5 Poutre Arm4)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element \neq Poutre
And [Apparence_Ecrasement] \neq PERTE TOTALE D'ENROBAGE
And [Apparence_Armature] \neq APPARENTE

THEN [Indice_Ecrasement] \neq 5
And [Indice_ArmatureEcrasement] \neq 4
And [Sévérité_Ecrasement] \neq TRES SEVERE
And [Sévérité_Armature] \neq POTENTIELLEMENT SEVERE
And [FactPriorité_EpauPoutre] \neq 3

REGLE NUMERO : 58 (Indice_DeflexionPoutre Poutre1)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element \neq Poutre
And [Deflexion_Poutre] \neq A PEINE PERCEPTIBLE

THEN [Indice_DeflexionPoutre] \neq 1
And [FactPriorité_DeflexionPoutre] \neq 2

REGLE NUMERO : 59 (Indice_DeflexionPoutre Poutre3)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
And [Deflexion_Poutre] #= VISIBLE

THEN [Indice_DeflexionPoutre] #= 3
And [FactPriorité_DeflexionPoutre] #= 2

REGLE NUMERO : 61 (Indice FLAMBEMENT Poteau 5)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Flambement_Poteau] #= VISIBLE

THEN [Indice_FlambementPoteau] #= 5

REGLE NUMERO : 63 (Indice_DommageTotal Poutre)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
And [Indice_Fissuration] > 0
Or [Indice_Epaufrure] > 0
Or [Indice_Ecrasement] > 0
Or [Indice_DeflexionPoutre] > 0

THEN [Indice_DommageTotal] #=

$$\frac{([FactPriorité_FissPoutre]*[Indice_Fissuration]) + ([FactPriorité_EpauPoutre]*[Indice_Epaufrure]) + ([FactPriorité_EcrasPoutre] * [Indice_Ecrasement]) + ([FactPriorité_DeflexionPoutre]*[Indice_DeflexionPoutre])}{([FactPriorité_FissPoutre] + [FactPriorité_EpauPoutre] + [FactPriorité_EcrasPoutre] + [FactPriorité_DeflexionPoutre])}$$

REGLE NUMERO : 64 (Indice_DommageTotal Poteau)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Indice_Fissuration] > 0
And [Indice_Epaufrure] > 0
And [Indice_Ecrasement] > 0
And [Indice_FlambementPoteau] > 0

THEN [Indice_DommageTotal] #=

$$\frac{([FactPriorité_FissPoteau]*[Indice_Fissuration]) + ([FactPriorité_EpauPoteau]*[Indice_Epaufrure]) + ([FactPriorité_EcrasPoteau]*[Indice_Ecrasement])}{([FactPriorité_FissPoteau] + [FactPriorité_EpauPoteau] + [FactPriorité_EcrasPoteau])}$$

REGLE NUMERO : 71 (Nombre de Sévérite très Faible)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
Or Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And [Sévérité_DommageTotal] #= TRES FAIBLE

THEN [Nombre_SévéritéTF] #= [Nombre_SévéritéTF] + 1

Note : [Nombre_SévéritéTF] =0 valeur initial:Nombre de sévérité très faible pour les Poteau

REGLE NUMERO : 76 (Rupture effet poteau court)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And Dommage_Ecrasement :Indice_Ecrasement > 0
And Dommage_Epaufrure :Indice_Epaufrure > 0
And Ecrasement :Apparence_Ecrasement #= Aux_appuis
And Condition_Armature :Flambées #= Oui
And Element_Structure :Elancement_géométrique > 5

THEN Estimation_Dommage :Mode_Rupture = " ROTULE PLASTIQUE SUR POTEAU COURT"
And Estimation_Dommage :Mode_Rupture = " CISAILLEMENT EXCESSIF PAR EFFET POTEAU COURT"
And Estimation_Dommage :Mode_Rupture = " INSUFFISANCE DES CADRES TRANSVERSAUX "
And Estimation_Dommage :Mode_Rupture = " DUCTILITE FAIBLE"

REGLE NUMERO : 77 (ESTIMATION GLOBALE PLANCHER 1)

IF Estimation_Dommage : Estimation_Globale #= Total_ElementPlancher
And ([Nombre_SévéritéTF] + [Nombre_SévéritéF] + [Nombre_SévéritéM] + [Nombre_SévéritéS] + [Nombre_SévéritéTS]) > 1

THEN [NbreTotal_PoteauEstimé] #= [Nombre_SévéritéTF] + [Nombre_SévéritéF] + [Nombre_SévéritéM] + [Nombre_SévéritéS] + [Nombre_SévéritéTS]

And [Proportion_SévéritéTF] #= [Nombre_SévéritéTF] / [NbreTotal_PoteauEstimé]
And [Proportion_SévéritéF] #= [Nombre_SévéritéF] / [NbreTotal_PoteauEstimé]
And [Proportion_SévéritéM] #= [Nombre_SévéritéM] / [NbreTotal_PoteauEstimé]
And [Proportion_SévéritéS] #= [Nombre_SévéritéS] / [NbreTotal_PoteauEstimé]
And [Proportion_SévéritéTS] #= [Nombre_SévéritéTS] / [NbreTotal_PoteauEstimé]

Note : [Proportion_SévéritéTF/F/M/S/TS] proportion de sévérité des dommages cas très faible, faible, modéré, sévère et très sévère

REGLE NUMERO : 78 (Poutre rotule plastique)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poteau
And Dommage_Ecrasement :Indice_Ecrasement > 0
And Dommage_Epaufrure :Indice_Epaufrure > 0
And Ecrasement :Localisatiion_Ecrasement #= Aux_appuis
And Condition_Armature :Flambées #= Non
And Condition_Armature :Corrodées #= Non

THEN Estimation_Dommage :Mode_Rupture = " ROTULE PLASTIQUE DUE AUX EFFETS DE L'ALTERNANCE DE L'EFFORT NORMAL ET DU MOMENT DE FLEXION"

REGLE NUMERO : 80 (Poutre Fissure incliné)

IF Estimation_Dommage :Estimation_Element #= Poutre
And Dommage_Fissuration :Indice_Fissure > 0
And Fissuration :Modèle_Fissure #= Incliné
And Fissuration :Localisatiion_Fissure #= Aux_appuis

THEN [Estimation_Dommage :Mode_Rupture = " FISSURES INCLINEES DUES AUX EFFETS DE L'EFFORT TRANCHANT "

REGLE NUMERO : 82 (DOMMAGE GLOBALE PLANCHER 1)

IF Estimation_Dommage : Estimation_Globale \neq Total_ElementPlancher
And [Indice_SévéritéTF] > 1
Or [Indice_SévéritéF] > 1
Or [Indice_SévéritéM] > 1
Or [Indice_SévéritéS] > 1
Or [Indice_SévéritéTS] > 1

THEN [IndiceDommageGlobal_ElementPlancher] \neq [Indice_SévéritéTF] +
 [Indice_SévéritéF] + [Indice_SévéritéM] + [Indice_SévéritéS] + [Indice_SévéritéTS]

Note : [IndiceDommageGlobal_ElementPlancher] indice dommage global plancher contenant tout les poteau estimés

REGLE NUMERO : 87 (Sévérité GLOBALE PLANCHER 6)

IF Estimation_Dommage : Estimation_Globale \neq Total_ElementPlancher
And [IndiceDommageGlobal_ElementPlancher] > 50

THEN [SévèritéGlobal_ElementPlancher] \neq TRES SEVERE
And [RECOMMANDATION] \neq RENFORCEMENT - DEMOLITION

REGLE NUMERO : 88 (Réparation Poteau _ Gainage métallique et Injection)

IF Estimation_Dommage : Estimation_Element \neq Poteau
And Dommage_Fissuration : Sévérité_Fissure \neq MODERE
And Dommage_Fissuration : Sévérité_Fissure \neq SEVERE
Or Dommage_Fissuration : Sévérité_Fissure \neq TRES SEVERE
Or Dommage_Ecrasement : Sévérité_Ecrasement \neq MODEREE

THEN Réhabilitation : Recommandation = REPARATION POTEAU
And Réhabilitation : Réparation = "GAINAGE METALLIQUE AVEC INJECTION DE RESINE EPOXYDIQUE DANS LES FISSURE"

ANNEXE 2

BASE OBJETS

BASE OBJETS

Classes(Class)	Attribut (Slots)	Valeurs (Values)
Type_Dommage	Dommage_Constaté	Fissuration, Epaufrure, Ecrasement, Déformation,
Fissuration	Localisation Modèle Densite-Fissure Largeur_Fissure	Au_centre, Le_long_de_la_portée, Aux_appuis Longitudinal, Transversal, Incliné, TypeX Variable Variable
Dommage_Fissuration	Indice_Fissuration Severite_Fissure Sévérité_LargeurFissure Sévérité_DensitéFissure Indice_LargeurFissure Indice_DensiteFissure FactPriorité_PoutreFissuré FactPriorité_PoteauFissuré FactPondération_Fissure	Calculer (Méthode) Aucune, Faible, Modéré, Sévère, Très_Sévère Aucune, Faible, Modéré, Sévère, Très_Sévère Aucune, Rare, Intermittante, Etendue, Partout 0, 1, 2,5, 4, 5 0, 1, 2, 3, 4, 5 1 1 Calculer Méthode
Epaufrure	Apparence_Epaufrure Etendue_Epaufrure	Aucune, Apeine_perceptible, Visible, Profondeur_Plus25mm, Profondeur40mm, Très_Profond Variable
Dommage_Epaufrure	Indice_Epaufrure Severite_Epaufrure Indice_ApparenceEpaufrure Sévérité_ApparenceEpaufrure Sévérité_EtendueEpaufrure Indice_EtendueEpaufrure FactPriorité_PoutreEpaufrure FactPriorité_PoteauEpaufrure FactPondération_Epaufrure Indice_ArmatureEpaufrure	Calculer (Méthode) Aucune, Très_Faible, Faible, Modéré, Sévère, Très_Sévère 0, 1, 2, 3, 4, 5 Aucune, Faible, Modéré, Sévère, Très_Sévère Aucune, Faible, Modéré, Considérable, Excessive 0, 1, 2, 3, 4 1 1/2 Calculer méthode 0, 4, 5

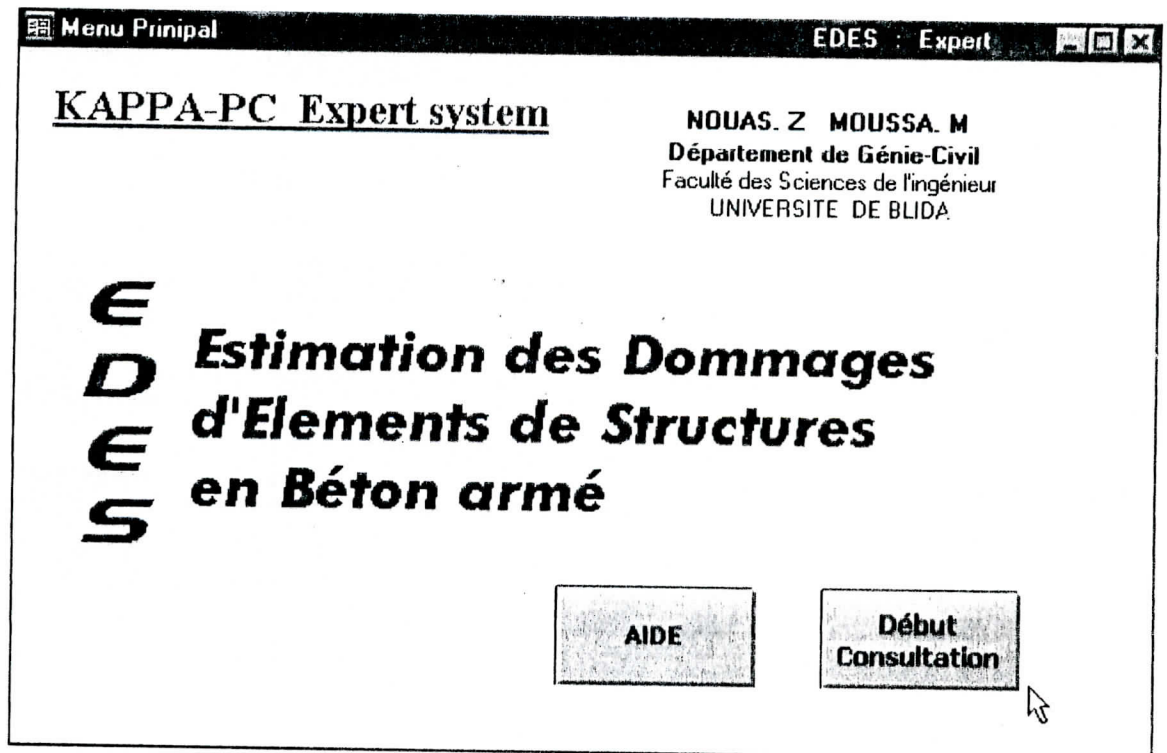
Condition_Armature	Indice_Armature Sévérite_Armature Indice_ArmatureEpaufure Indice_ArmatureEcrasement Condition_Armatures	Méthode [Maxi(Indice_ArmatureEpaufure, Indice_ArmatureEcrasement)] Aucune_avec_PotentielCorrosion, Potentiellement_Sévère , Très_Sévère 0 , 4 , 5 0 , 4 , 5 Aucune, Apeine_apparentes, Apparentes, Corrodées , Flambées
Ecrasement	Apparence_Ecrasement	Aucun , Ecrasement_sansEpaufure , Ecrasement_Local, Ecrasement_remarquable, Perte_Totale_Enrobage
Domage_Ecrasement	Indice_Ecrasement Severite_Ecrasement FactPriorité_PoutreEcrasement FactPriorité_PoteauEcrasement FactPondération_Ecrasement	0 , 3 , 4 , 5 Aucune, Modéré, Sévère, Très_Sévère 3 2 Calculer Méthode
Deformation	Fléchissement_Poutre Flambement_Poteau	Aucune, Apeine_Perceptible, Visible, Excessive Aucun, Visible
Domage_Déformation	Indice_FléchissementPoutre Indice_FlambementPoteau FactPriorité_PoutreDéformation FactPondération_Déformation	0 , 1 , 3 , 5 0 , 5 2 Calculer Méthode
Estimation_Dommages	Indice_Fissuration Indice_Epaufure Indice_Ecrasement Indice_Deformation Indice_Armature Indice_DommageTotal Sévérité_DommageTotal Mode_Rupture Nombre_SévéritéTF Nombre_SévéritéF Nombre_SévéritéM	Calculé (Méthode) Calculé (Méthode) 0 , 3 , 4 , 5 Règle (Méthode) Méthode [Maxi(Indice_ArmatureEpaufure,Indice_Armatu reEcrasement)] Calculer (Méthode) $D = \sum I_i P_i$ Aucun, Très_faible, Faible, Modéré, Sévère, Très_sévère Variable 0 0 0

	Nombre_SévéritéS Nombre_SévéritéTS NombreTotal_PoteauEstimé Proportion_SévéritéTF Proportion_SévéritéF Proportion_SévéritéM Proportion_SévéritéS Proportion_SévéritéTS Indice_SévéritéTF Indice_SévéritéF Indice_SévéritéM Indice_SévéritéS Indice_SévéritéTS Indice_DommageGlobal Sévérité_DommageGlobal_ Estimation_Element	0 0 Variable Calculer $Proportion_Sévérité = N_p S_i / \sum N_p S_i$ Calculer $Proportion_Sévérité = N_p S_i / \sum N_p S_i$ Calculer $Proportion_Sévérité = N_p S_i / \sum N_p S_i$ Calculer $Proportion_Sévérité = N_p S_i / \sum N_p S_i$ Calculer $Proportion_Sévérité = N_p S_i / \sum N_p S_i$ [10* Proportion_Sévérité], 5 [26* Proportion_Sévérité], 13 [60* Proportion_Sévérité], 30 [100*Proportion_Sévérité], 50 [1000 *Proportion_Sévérité/7], 50 Calculer (Méthode) $\sum (indice_Sévérité)$, Aucune, Très_faible, Faible, Modéré, Sévère, Très_sévère Poutre , Poteau
Réhabilitation	Gainage Injection Etalement Recommandation Recommandation_GlobalNiveau Mesure d'urgence Renforcement	Variable Variable Variable Variable Variable Variable Variable
Construction	Systeme_Structural Age_Construction Usage_construction Nombre_Niveau Hauteur_Niveau Numéro_Niveau NombreTotal_ElemenNiveau NombreTotal_PoteauNiveau NombrePoteaux_Endommagées	Plancher_caissons, Portique_rigide_contreventé, Portique_rigide_noncontreventé Inconnue, Colonial, Après_80 Logement, Administratif, Scolaire, Hospitalier, Commercial Industriel, Sportif Variable Variable Variable Variable Variable Variable

	Construction_CalculéSeisme	Oui,Non
	Construction_Controlé	Oui,Non
	Zone	Text
	Adresse	Text
	Secteur	Text
	Element_independant	Escalier, Auvent, passage_couvert, autres,....
	Superstructure	Autostable, Voile, Mixte, îèrres, Maçonnerie
	Infrastructure	Radier, Semalles_isolées, Semelles_filantes, Puit, Pieu
	Vide sanitaire	Oui, Non
Element_structure	Longueur	Variable
	Section	Variable
	Hauteur	Variable
	Elancement_géométrique	Méthode
	Coté_a	Variable
	Coté_b	Variable
	Numéro_Element	Variable
Renseignement	Inspecteur	Text
	Client	Text
	Date	Text
	Activité	Text
	Nom_Personne	Text
	Fonction	Text
	Adresse_Personne	Text
	Tél_Personne	Numérique
	Fax_Personne	Numérique

ANNEXE 3

INTERFACE UTILISATEUR



Interface 1: Menu Principal *EDES : Expert*

Menu FICHE CLIENT EDES : Expert

FICHE CLIENT Date

Code inspecteur

Client

Activité

Personne rencontrée Fonction

Adresse

Tél Fax

IDENTIFICATION DE LA CONSTRUCTION

Secteur Zone

Adresse ou élément d'identification

Construction calculée au séisme
 Oui
 Non

Construction contrôlée
 Oui
 Non

EDES : Expert

Interface 2 : Information Client & Identification construction *EDES : Expert*

Menu DESCRIPTION CONSTRUCTION		EDES : Expert	
Age de la const		Système structural	
<input type="radio"/> Inconnu	<input type="radio"/> Portique_autostable_maçonnerie_rigide	Caractéristique	
<input type="radio"/> Avant80	<input type="radio"/> Portique_autostable_maçonnerie_Non_rigide	Nombre de niveaux	<input type="text"/>
<input checked="" type="radio"/> Après80		Hauteur du niveau (m)	<input type="text"/>
Usage de la construction	Elements extérieurs indépendants	Superstructure	Infrastructure
<input checked="" type="radio"/> Logement	<input checked="" type="checkbox"/> Escaliers	<input checked="" type="radio"/> Autostable	<input checked="" type="checkbox"/> Radier
<input type="radio"/> Administratif	<input type="checkbox"/> Auvent	<input type="radio"/> Voile	<input type="checkbox"/> Semelles_isolées
<input type="radio"/> Scolaire	<input type="checkbox"/> Passage_couvert	<input type="radio"/> Mixte	<input type="checkbox"/> Semelles_filantes
<input type="radio"/> Hospitalier	<input type="checkbox"/> Autres	<input type="radio"/> Pierres	<input type="checkbox"/> Puit
<input type="radio"/> Commercial	Vide sanitaire	<input type="radio"/> Maçonnerie	<input type="checkbox"/> Pieu
<input type="radio"/> Industriel	<input checked="" type="radio"/> Oui		
<input type="radio"/> Sportif	<input type="radio"/> Non		
Autres (à préciser)	<input type="text"/>	ESTIMATION Element de structure	
EDES : Expert		Précédent	
		AIDE	

Interface 3: Données Construction EDES : Expert

Menu ELEMENT DE STRUCTURE EDES : Expert

ESTIMATION DES DOMMAGES

Element de structure

Poutre
 Poteau

Caractéristique

Longueur (m)
Hauteur (m)
 a
 b
Numéro du Niveau
Nombre Total de Poteaux par Niveau
Nombre Total de Poteaux Endommagés

Type de Dommages constatés

Fissuration
 Epaufure
 Ecrasement
 Déformation

Apparence Armatures

Aucune
 Apeine Apparente
 Apparente
 Corrodées
 Flambées

EDES : Expert

Interface 4: Estimation des dommages d'un élément de structure *EDES : Expert*

Menu TYPE DE DOMMAGE EDES : Expert

SIGNE DE DOMMAGES OBSERVES

Dommege par Fissuration

Modèle de Fissure

Longitudinale

Transversale

Incliné

TypeX

Localisation de la Fissure

Au_centre

Le_long_de_lélément

Aux_appuis

Apparence de la Fissure

Largeur Maxi observée (mm)

Densité (%)

Dommege par Epaufure

Apparence des Epaufures

Aucune

Apeine_perceptible

Visible

Profondeur_plus25mm

Profondeur40mm

Très_Profond

Etendue Epaufure (%)

Dommege par Ecrasement

Apparence Ecrasement

Aucun

Ecrasement_sans_Epaufure

Ecrasement_Local

Ecrasement_remarquable

Perte_totale_Enrobage

Dommege par Déformation

Fléchissement Poutre

Aucun

Apeine_perceptible

Visible

Excessive

ESTIMATION

Précédent

AIDE

EDES : Expert

Interface 5: Observation visuelle des dommages *EDES : Expert*

ESTIMATION
EDES : Expert

ESTIMATION ELEMENT DE STRUCTURE

<u>Indice de fissuration</u>	<input type="text" value="0"/>	Poutre	<u>Sévérité de fissuration</u>	<input type="text" value="Aucune"/>
<u>Indice d'épaufrure</u>	<input type="text" value="0"/>	N° 7	<u>Sévérité d'épaufrure</u>	<input type="text" value="Aucune"/>
<u>Indice d'écrasement</u>	<input type="text" value="0"/>		<u>Sévérité d'écrasement</u>	<input type="text" value="Aucune"/>
<u>Indice de Fléchissement Poutre</u>	<input type="text" value="0"/>		<u>Sévérité de Fléchissement Poutre</u>	<input type="text" value="Aucune"/>
<u>Indice de Flambement Poteau</u>	<input type="text" value="0"/>		<u>Sévérité de Flambement Poteau</u>	<input type="text" value="Aucune"/>
<u>Indice Condition d'armatures</u>	<input type="text" value="0"/>		<u>Sévérité condition d'armatures</u>	<input type="text" value="Aucune avec potentiel de corrosion"/>

Indice d'endommagement total de l'élément

Sévérité de l'endommagement total

Mode de rupture

Recommandation

EDES : Expert

Autre Element de structure à Estimer

Estimation Globale Niveau

Précédent

Rapport

Interface 6: Estimation des dommages d'un élément de structure EDES : Expert

ANNEXE 4

FICHE TECHNIQUE D'EVALUATION

FICHE D'EVALUATION DES DOMMAGES SEISME DE BENI CHOU GRANI DU 18.08.94			
Code Inspecteur			
Date :			
IDENTIFICATION DE LA CONSTRUCTION			
Secteur	zone	Construction calculée au seisme : Oui - Non	
Adresse ou éléments d'identification		Construction contrôlée : Oui - Non	
USAGE DE LA CONSTRUCTION (*)			
Logement	Scolaire	Commercial	
Administratif	Hospitalier	Industriel	
Socioculturel	Sportif	Réservoir d'eau	
Autres (à préciser)			
DESCRIPTION SOMMAIRE			
Age approximatif :	Vide sanitaire :	Oui - Non (*)	
Nombre de niveaux :	Sous-sol :	Oui - Non (*)	
Nombre de joints de dilatation :	Eléments extérieurs indépendants (escaliers, auvent, passage couvert.)		
- en élévation:			
- Infrastructure			
Problème de sol autour de la construction (*)			
Faïlle :	Oui - Non	- Affaissement - Soulèvement : Oui - Non	
Liquéfaction :	Oui - Non	- Glissement : Oui - Non	
FONDATIONS - INFRASTRUCTURE (*)			
<u>Fondations :</u>		<u>Infrastructure</u> (dans le cas VS ou S/Sol)	
- type de fondation		- voile béton continu : 1-2-3-4-5	
- type de dommages		- poteaux béton avec remplissage : 1-2-3-4-5	
. tassement uniforme :	Oui - Non		
. Glissement :	Oui - Non		
. Basculement :	Oui - Non		
STRUCTURE RESISTANTE (*)			
<u>Eléments porteurs (charges verticales)</u>		<u>Eléments de contreventement</u>	
- murs en maçonnerie	1-2-3-4-5	- murs en maçonnerie	1-2-3-4-5
- Voiles béton	1-2-3-4-5	- voiles béton	1-2-3-4-5
- poteaux béton	1-2-3-4-5	- portiques béton armé	1-2-3-4-5
- poteaux métalliques	1-2-3-4-5	- portiques métalliques	1-2-3-4-5
- poteaux bois	1-2-3-4-5	- palées triangulées	1-2-3-4-5
- autres	1-2-3-4-5	- autres	1-2-3-4-5
<u>Planchers - Toiture terrasse</u>		<u>Toiture inclinée</u>	
- béton armé	1-2-3-4-5	- charpente métallique	1-2-3-4-5
- solives métalliques	1-2-3-4-5	- charpente bois	1-2-3-4-5
- solives bois	1-2-3-4-5	- Couverture tuile	1-2-3-4-5
	1-2-3-4-5	- Couverture amiante ciment	1-2-3-4-5
		- Couverture métallique	1-2-3-4-5
(*) entourer la mention utile, dans le cas de numéros : un ou plusieurs numéros peuvent être entourés			

ELEMENTS SECONDAIRES						
<u>Escaliers</u>		<u>Remplissages extérieurs</u>				
- Béton	1-2-3-4-5	- maçonnerie	1-2-3-4-5			
- métal	1-2-3-4-5	- béton préfabrique	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>		<u>Eléments extérieurs</u>				
- plafonds	1-2-3-4-5	- balcons	1-2-3-4-5			
- cloisons	1-2-3-4-5	- garde-corps	1-2-3-4-5			
- éléments vitrés	1-2-3-4-5	- au vent	1-2-3-4-5			
-		- acrotères-corniches	1-2-3-4-5			
-		- cheminées	1-2-3-4-5			
-		- Autres	1-2-3-4-5			
INFLUENCE DES CONSTRUCTIONS ADJACENTES (*)						
La construction menace une autre construction			Oui - Non			
La construction est menacée par une autre construction			Oui - Non			
La construction peut-être un soutien pour une autre construction			Oui - Non			
La construction peut-être soutenue par une autre construction			Oui - Non			
VICTIMES (*)						
Oui - Non - Peut-être		Si oui combien ?				
COMMENTAIRES SUR LA NATURE ET LA CAUSE PROBABLE DES DOMMAGES						
	<u>Sens transversal (*)</u>			<u>Sens longitudinal (*)</u>		
- symétrie en plan	bon	moyen	mauvais	bon	moyen	mauvais
- régularité en élévation	bon	moyen	mauvais	bon	moyen	mauvais
- redondances des files	bon	moyen	mauvais	bon	moyen	mauvais
AUTRES COMMENTAIRES :						
EVALUATION FINALE (*)						
<u>Niveau général des dommages</u>				<u>Couleur à utiliser</u>		
1 - 2 - 3 - 4 - 5				VERT - ORANGE - ROUGE		
MESURES IMMEDIATES A PRENDRE :						

Notice explicative des degres d'endommagement

NIVEAU DES DOMMAGES

degré 1 : Pas de dommages

A l'exception des meubles renversés et des glaces cassées

degré 2 : Dommages légers

Fissures des cloisons intérieures
Fissures des plafonds
Dommages pour canalisation d'eau, électricité, lustres renversés
En résumé, dommages non structurels isolés

Remarques Prendre le cas le plus défavorable et faire un commentaire si c'est nécessaire

degré 3 : Dommages modérés

Dommages importants pour les parties non structurales et dommages faibles pour les parties structurales

- Parties non structurales :

Toutes les parties d'architecture et ce qui ne fait pas partie du système structural

- Partie structurales :

Système porteur (voiles, ossatures avec remplissage ou la combinaison des deux)

Remarque Dans le cas de rupture des vides-sanitaires, et si le bâtiment est descendu en s'inclinant même si la superstructure n'a rien, classer ce type de dommage dans la catégorie 4

Degré 4 Dommages importants.

- Dommages non structuraux très importants et dommages structuraux considérables
- Fissures en X dans les voiles de contreventement, éclatement des nœuds poutres-poteaux

Remarque :

Soyez sûrs de bien choisir entre les niveaux 3 et 4. N'hésitez pas à demander l'avis d'autres ingénieurs

degré 5 : Bâtiments à condamner ou effondrés

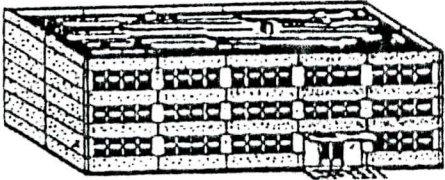
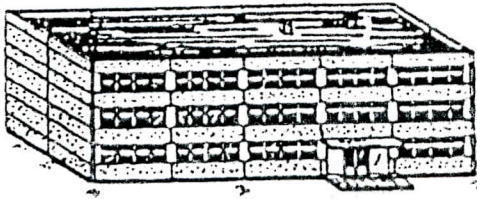

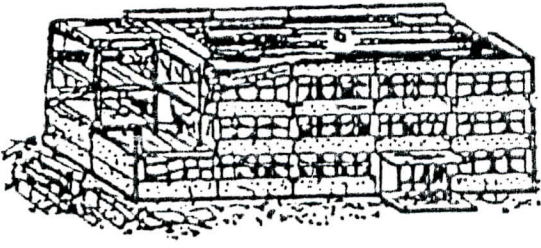
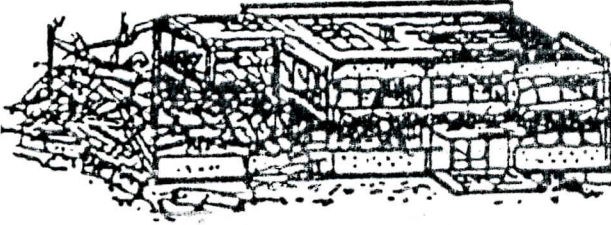
- Par exemple
- Un étage a disparu
 - un bâtiment a basculé
 - trop de nœuds poutres-poteaux éclatés

En general, les bâtiments a condamner sont ceux qui ont subi trop de déformations, ou dont la réparation coûterait aussi cher que le prix initial du bâtiment

EN CONCLUSION

- | | |
|------------------|---------------|
| - Couleur verte | Niveau 1 et 2 |
| - Couleur orange | Niveau 3 et 4 |
| - Couleur rouge | Niveau 5 |

Classification des dommages des bâtiments en béton armé

	<p>Grade 1 : Dommage négligeable à faible (pas d'endommagement structural)</p> <p>Fissure fine dans le plâtre au niveau des murs de séparation</p>
	<p>Grade 2 : Dommage modéré (faible endommagement structural)</p> <p>Fissure très fine dans les poteaux et poutres, le mortier se désagrège fissures dans les murs de séparation et perte d'élément en plâtres</p>
	<p>Grade 3 : Dommage Sévère (Endommagement structural Modéré)</p> <p>Fissures dans les poteaux et poutres avec apparition des épaufrures .</p>
	<p>Grade 4 : Dommage sévère à très sévère (Endommagement structural sévère)</p> <p>Endommagement sévère dans les nœuds et poteaux et les poutre avec écrasement du béton (Flambement des armatures) effondrement partiel avec déplacement des nœuds de poteaux</p>
	<p>Grade 5 : Dommage Très sévère (Endommagement structural très sévère)</p> <p>Effondrement quasi-total de la construction</p>

ANNEXE 5

LOGICIEL KAPPA-PC 2.1

Le générateur de systèmes à base de connaissances KAPPA-PC (d'IntelliCorp)

D.E.S.S. Double Compétence Informatique et Sciences Sociales
Module Sciences Cognitives et Représentation de Connaissances

année 2000/2001

Jérôme GENSEL

Qu'est-ce que KAPPA-PC ?

- KAPPA-PC est un générateur de SBC commercialisé par Intellicorp
- Représentation des connaissances en KAPPA-PC:
 - ▮ règles de production: objets-attributs-valeurs avec variables
 - ▮ représentation orientée objets: héritage simple
- Autres caractéristiques de KAPPA-PC:
 - ▮ intégration avec les logiciels WINDOWS (tableur + BD)
 - ▮ construction d'interfaces utilisateurs "à la Visual-BASIC"
 - ▮ possibilité de compiler les bases de connaissances pour générer des exécutables

RPO - J. Gensel

Développement d'une application avec KAPPA-PC

- 1) Structurer et construire la base d'objets
- 2) Écrire les méthodes et les règles
- 3) Paramétrer le moteur d'inférences
- 4) Développer l'interface utilisateur

RPO - J. Gensel

L'écran de KAPPA-PC

RPO - J. Gensel

La représentation objets de KAPPA-PC

KAPPA-PC est un LOO à héritage simple: le graphe d'héritage est un arbre

Les classes

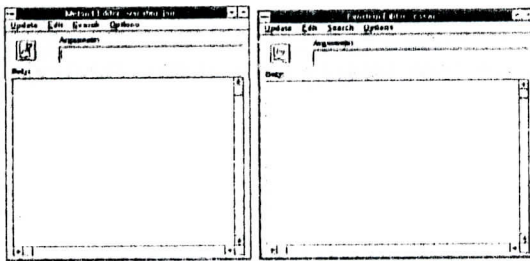
- prédefinies (31): Root, KWindow, ...
- créées par l'utilisateur

L'éditeur de classes:

RPO - J. Gensel

Les méthodes

Les éditeurs de méthodes et de fonctions:



RPO - J. Gensel

13

Le langage KAL

Programmation fonctionnelle:

toute méthode et fonction écrite en KAL retourne une valeur

Structure d'une fonction ou une méthode KAL:

```
f(arg1, ..., argn)
{
  instruction1
  ...
  instruction n
};
```

Valeur retournée par f:

valeur retournée par la dernière instruction de f

Attention: les identificateurs sont sensibles aux majuscules

RPO - J. Gensel

14

Types de données de base

nombre (Number)

entier: -56 565

réel: -2.77

symbole (Atom): atome "ceci est aussi un atome"

chaîne de caractères (String): Idem symbole

booléen (Boolean): TRUE FALSE

objet (Object): caractérisé par un identificateur: Self
mon objet

liste (List): attribut multi-valué d'un objet LIST: 2 5 2

RPO - J. Gensel

15

Éléments de base du langage

variables

Identificateurs commençant par une lettre

attribut d'un objet: *objet.attribut*

v3:pulsance

v3:proprio:age

Remarque:

objet Self dans une méthode: objet auquel s'applique la méthode
Self/val

RPO - J. Gensel

16

Les fonctions prédéfinies de KAL

fonctions arithmétiques

fonctions sur les chaînes de caractères

fonctions sur le système d'exploitation

structures de contrôle

manipulation de listes

manipulation de fichiers

manipulation graphiques (interfaces utilisateurs)

fonctions d'accès à des bases de données et tableurs externes

manipulation de la base d'objets

manipulation de la base de règle

manipulation du moteur d'inférence

RPO - J. Gensel

17

Fonctions arithmétiques

- : affectation

patient:temperature = patient:temperature + 0.3

note: on peut seulement affecter l'attribut d'un objet, pas une variable

+= : Incrément-affectation

patient:temperature += 0.3

Abs, Cos, Log, Sin, Sqrt, ^, +, -, *, /, ... : fonctions arithmétiques

hyp:longueur=sqrt(c1:longueur^2 + c2:longueur^2)

==, !=, <, >, <=, >=, ... : opérateurs relationnels

If patient:sexe == m Then ...

Attention: test d'égalité: ==

test d'inégalité: !=

RPO - J. Gensel

18

Les attributs

Dans KAPPA-PC, les attributs possèdent un certain nombre de caractéristiques (facettes):

- type
- cardinalité
- valeurs autorisées
- ...

La valeur de l'attribut d'un objet peut être déterminée:

- par la programmation objet: valeur par défaut, héritage, méthode
- par une base de règles
- par une fonction écrite dans le langage de programmation KAL
- par l'interface utilisateur
- par accès à une BD ou à un tableur externe

RPO - J. Geisel

Les attributs

L'éditeur d'attributs:

RPO - J. Geisel

Les facettes des attributs

Type de valeur de l'attribut (Value Type):

- I TEXT: chaîne de car
- I NUMBER: entier ou réel
- I BOOLEAN: vrai (TRUE) ou faux (FALSE)
- I OBJECT: objet

Valeur (Value(s)):

spécifie la valeur par défaut de l'attribut (optionnel)

Cardinalité (Cardinality):

- Simple ou mono-valuée (Single): l'attribut peut prendre une seule valeur (à un instant donné)
- Multiple ou multi-valuée (Multiple): l'attribut peut prendre plusieurs valeurs (stockées dans une liste)

RPO - J. Geisel

9

Les facettes des attributs

Valeurs autorisées (Allowable Values):

permet de contrôler la validité des informations saisies par l'utilisateur

- attribut numérique: (valeur-min, valeur max)
- attribut objet: classe dont la valeur doit être une instance
- attribut chaîne de car.: liste des chaînes autorisées

Message d'interrogation (Prompt):

question posée à l'utilisateur pour obtenir la valeur de l'attribut (fonction AskValue)

Propagation de l'héritage (Héritage):

définit si les sous-classes doivent hériter de l'attribut

RPO - J. Geisel

10

Les facettes des attributs

Les démons (Monitors):

affectent la manière dont KAPPA-PC accède à l'attribut en lecture et/ou en écriture

- If Needed: méthode lancée si, lors de la recherche de la valeur de l'attribut, celle-ci est inconnue
- When Accessed: méthode lancée si la valeur de l'attribut est recherchée (même si elle est déjà connue)
- Before Change: méthode lancée avant la modification de la valeur de l'attribut
- After Change: méthode lancée après la modification de la valeur de l'attribut

RPO - J. Geisel

11

Les méthodes

Les méthodes sont écrites dans le LOO de KAPPA-PC appelé KAL

Une méthode écrite en KAL effectue des traitements en:

- envoyant des messages à d'autres objets
- exécutant des fonctions prédéfinies de KAL

RPO - J. Geisel

12

ANNEXE 6

A.H.P

(ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS)

Le procédé (AHP) est un modèle flexible qui permet aux individus ou groupes de former des idées et de définir des problèmes en élaborant leurs propres propositions et aboutir à la solution attendue ou désirée. Ce procédé permet également aux individus de tester la sensibilité ou la sensibilité de la solution ou des résultats.

Le procédé (AHP) s'accommode bien avec la nature de l'homme, et ne nous force pas à adopter un mode de pensée qui pourrait aller à l'encontre de notre appréciation. AHP marie l'estimation et les valeurs personnelles d'une manière logique. Ce procédé utilise d'une part l'imagination, l'expérience et la connaissance pour structurer un problème, et d'autre part, la logique, l'intuition et l'expérience pour fournir une appréciation.

AHP est assez flexible pour permettre la révision des décisions qui ont été prises par les décideurs. Ces derniers peuvent extrapoler ou étendre les éléments de la hiérarchie d'un problème et changer leur estimation ou leur jugement.

Une autre caractéristique de ce procédé est qu'il fournit une base d'étude pour un groupe participant à la prise de décision ou à la résolution d'un problème. Leurs idées et leurs appréciations peuvent être remises en questions, elles peuvent être renforcées ou au contraire affaiblies par des preuves présentées par d'autres personnes. Le groupe peut contribuer à la justesse ou à la force du résultat. Ainsi, l'on pourrait inclure dans le procédé toute information dérivant scientifiquement ou intuitivement.

AHP est un procédé de 'rationalité systémique' : il nous permet de considérer un problème en temps qu'ensemble et d'étudier les interactions simultanées de ses composants dans la hiérarchie ».

▪ **Exemple : Achat d'une maison [30]**

L'exemple traité ci dessous concerne le choix d'achat d'une maison lorsque plusieurs maisons sont disponibles présentant chacune un certain nombre de caractéristiques interdépendantes et de nature différente. Tout le problème réside dans l'établissement d'une hiérarchie ou d'une structure qui définit le problème dans son ensemble en

relatant les différents critères auxquels satisfont les maisons, ainsi que l'établissement de priorités ou de comparaisons de ces critères entre eux, et la comparaison des différentes alternatives offertes par rapport à chaque critère.

L'application de la méthode (AHP) permet de sélectionner en définitif la maison ou l'alternative la plus satisfaisante donc celle présentant la priorité la plus importante.

Le niveau 1 représente l'objectif à atteindre c'est à dire la maison la plus satisfaisante.

Le niveau 2 représente les critères utilisés qui entrent dans le choix d'une maison à savoir, sa superficie, la localisation ou proximité des arrêts de bus, le voisinage, l'âge de la maison, la superficie de la cour, les facilités modernes, les disponibilités financières, l'état générale.

Le niveau 3 représente les alternatives, dans ce cas la maison A, B et C.

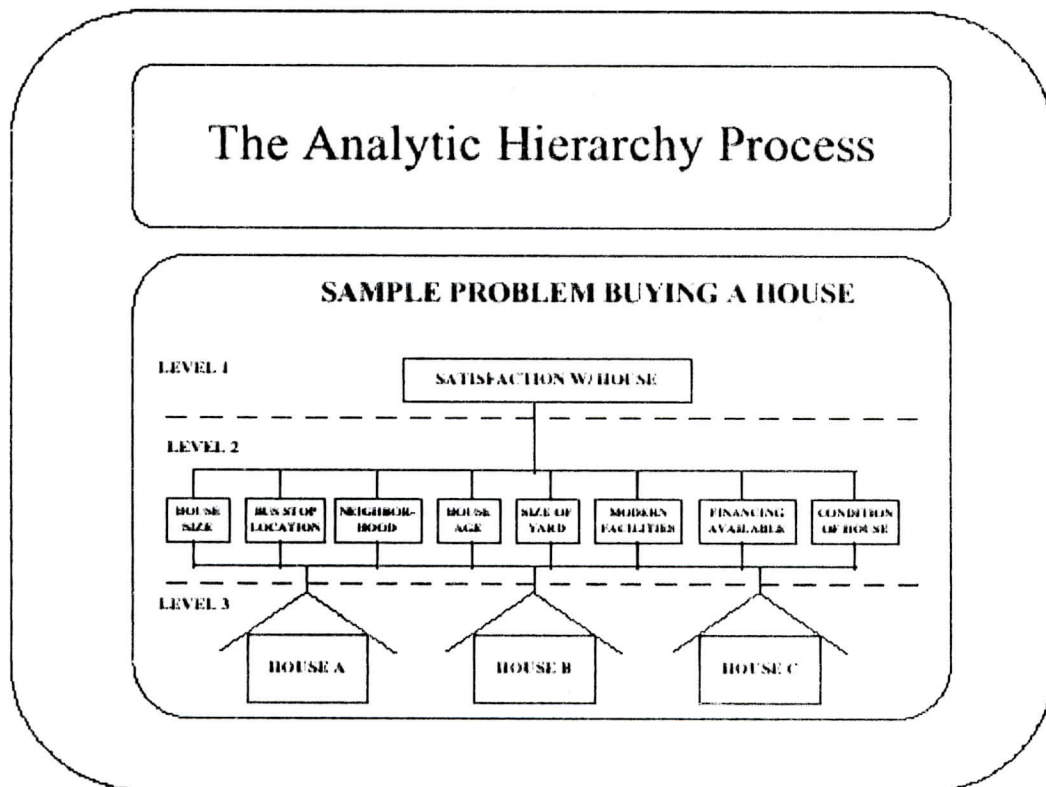


Fig. 6-1 : Définition et hiérarchisation du problème relevant de l'achat d'une maison

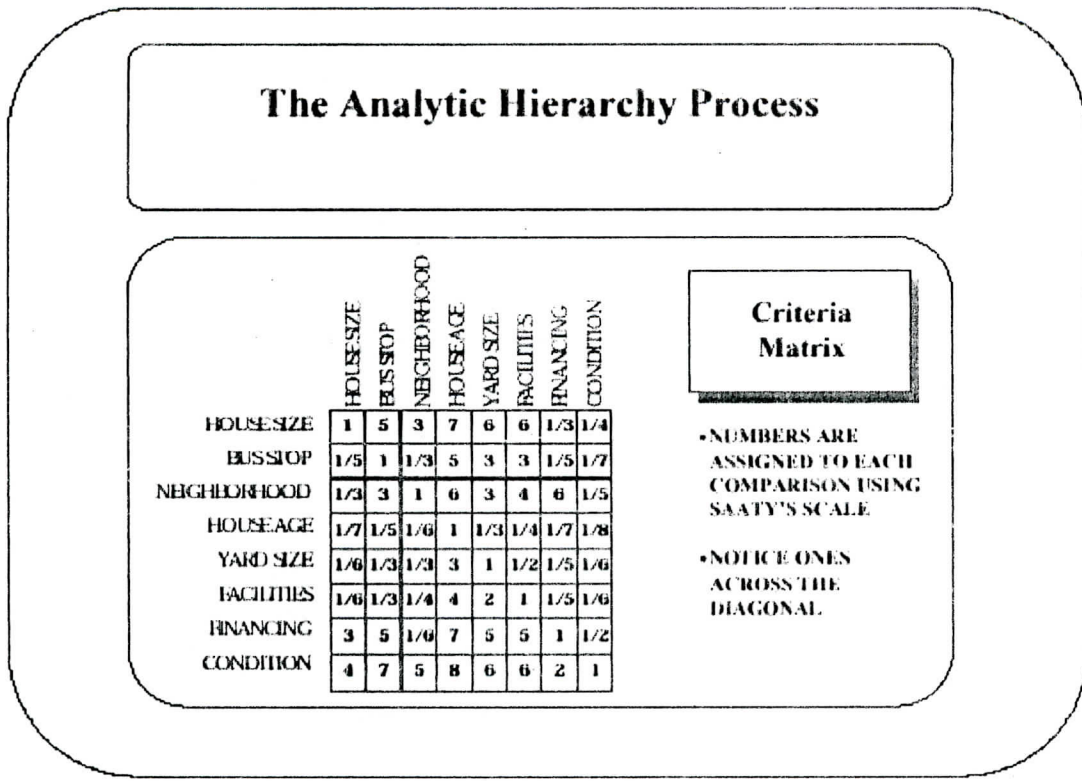


Tableau 6-1 : *Matrice des critères*

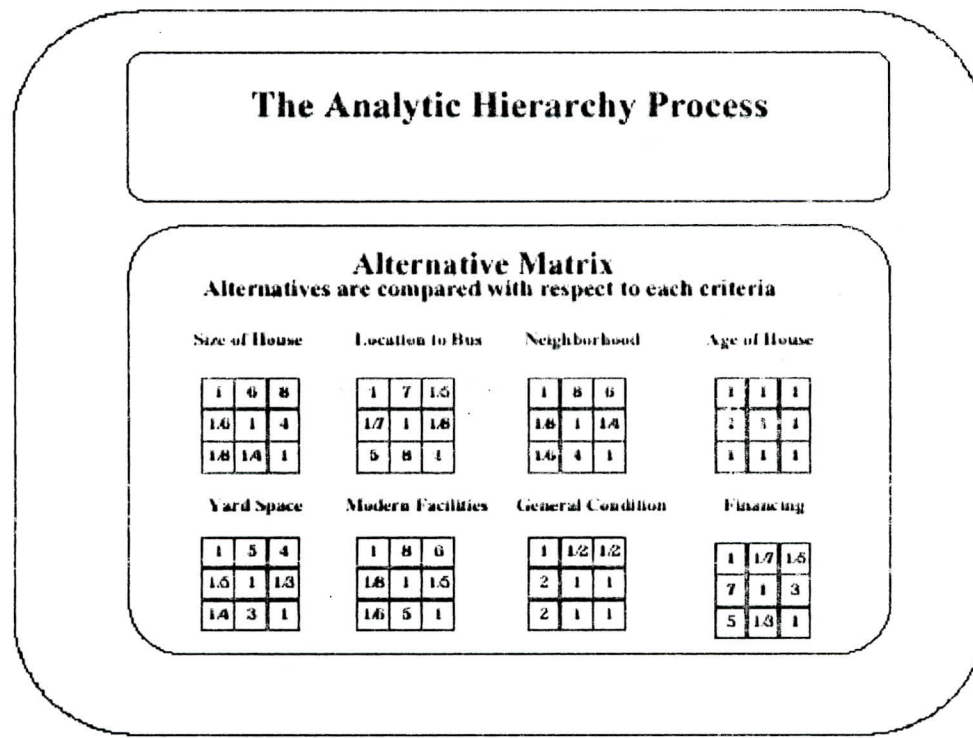


Tableau 6-2 : *Matrices des alternatives*
Les alternatives sont comparées en respectant chaque critère

La matrice des critères assoit les priorités de chaque critère par rapport aux autres en utilisant des nombres (Echelle d'importance relative de Satty [22] d'un critère i par rapport à un critère j).

La première ligne de la matrice des critères donne la priorité du critère superficie de la maison par rapport à lui même et par rapport aux autres critères par le biais de couples de comparaison. Le premier couple ($i=1, j=1$) donne la valeur 1, c'est à dire le critère superficie de la maison a la même intensité de priorité que lui même, ce qui est logique ; il y va de même pour toute la diagonale de la matrice qui compare les couples de même nature. Le second couple ($i=1, j=2$) a la valeur 5, ce qui signifie que le critère de la superficie de la maison est considéré comme essentiellement plus important que celui de la localisation a proximité des moyens de transport (bus). Le troisième couple ($i=1, j=3$) a la valeur 3, ce qui signifie que le critère de la superficie de la maison est considéré comme faiblement à modérément plus important que celui du voisinage. Le dernier couple de la ligne 1 ($i=1, j=8$) a la valeur $1/4$, ce qui signifie que le critère de la superficie de la maison est considéré comme modérément à fortement moins important que celui de l'état générale de la maison, c'est dire que le critère de l'état général de la maison est modérément à fortement plus important que celui de la superficie de la maison (valeur inverse du couple ($i=8, j=1$)). La première colonne de la matrice a les valeurs inverses de la première ligne. La matrice des critères est une matrice symétrique.

Les matrices des alternatives donnent une comparaison des trois alternatives ou maisons disponibles par rapport à chacun des critères précédemment énumérés. La première ligne de la matrice des alternatives par rapport au critère de la superficie de la maison compare la maison A à la maison B et C. La maison A est beaucoup plus grande que la maison B et nettement plus grande que la maison C. La quatrième matrice est unitaire, c'est dire que les trois maisons ont le même âge.

Décision finale

Après avoir calculé les poids des priorités de chaque matrice et après combinaison linéaire, le vecteur de priorité est obtenu.



