

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Civil

MÉMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Construction

**UN SYSTÈME INTELLIGENT POUR L'ESTIMATION DE LA
VULNÉRABILITÉ DES CONSTRUCTIONS**

Par

Hichem NOURA

Devant le jury composé de :

N.BOURLAHLA	Professeur, U. de Blida	Président
M.BENSAIBI	Professeur, U. de Blida	Examineur
D.AMAR BOUZID	Maître de conférences, U. de Média	Examineur
M.ABED	Professeur, U. de Blida	Rapporteur

Blida, juin 2011

ملخص

لتقدير آثار ما بعد الزلازل على المباني ، من المرغوب السيطرة على المعايير التي تؤثر في الهشاشة الزلزالية للمباني . القدرة على قياس أكثر دقة الهشاشة الزلزالية للمباني اليوم هو واحدة من أهم التحديات التي تواجه المهندسين الهيكلية . نتائج هذه الدراسات مهمة في الحد من الخسائر البشرية والمادية للزلازل في المستقبل في الوقت الذي تسمح فيه إجراءات لتعزيز الهياكل القائمة وتحسين إدارة أزمة ما بعد الزلازل .

وفي هذا السياق، نقدم هذا العمل ليصف نهج باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية كأداة لتقييم الهشاشة الزلزالية للمباني.

لنتعامل مع هذه الحالات، قاعدة من 130 حالة لمباني مستخدمة في التقييم استعملت لهندست الشبكات العصبية لتشكيل مرحلة التعلم من خلال برنامج MATLAB 7.8 . ويتم اختيار العوامل المؤثرة على الهشاشة الزلزالية للمباني بشكل مختلف لاحتواء جميع الحالات المحتملة .

في الواقع، يتم استخدام قاعدة بيانات أخرى تحتوي 11 حالة لمباني مستخدمة في التقييم ، لمقارنة النتائج التي قدمها نظام الشبكات العصبية مع خبرات المهندسين (أهداف الأداء). وقد أبرزت نتائج مرضية في ما يتعلق دقة تقدير الهشاشة الزلزالية للمباني.

الكلمات الهامة:

الهشاشة، الفكاء الاصطناعي، الشبكات العصبية، تقدير الهشاشة الزلزالية للمباني.

RÉSUMÉ

Afin de prédire les conséquences post-sismiques sur les constructions, il est opportun de maîtriser les paramètres influents sur la vulnérabilité du bâti. L'aptitude à pouvoir mesurer le plus fidèlement cette vulnérabilité est aujourd'hui un des défis les plus cruciaux auquel sont confrontés les ingénieurs de structure. Les résultats de telles études sont importants dans la réduction de pertes humaines et matérielles pour des séismes futurs tout en permettant des actions de renforcement de structures existantes et une meilleure gestion de la crise post-sismique.

Dans ce contexte, le travail que nous présentons expose une approche utilisant les Réseaux de Neurones (RN) comme outil pour évaluer la vulnérabilité d'une construction. En effet, un système de RN, plus un ensemble de constructions expertisées est mis en place pour constituer d'abord une phase d'apprentissage. Dans une seconde phase, ce système est utilisé pour prédire la vulnérabilité d'un autre ensemble de constructions.

Une base de 130 cas de constructions expertisées est utilisée dans une architecture de RN pour constituer la phase d'apprentissage par le logiciel MATLAB 7.8. Les paramètres décrivant ces constructions sont choisis de manière différente pour contenir tous les cas possibles.

En effet, une autre base constituant 11 constructions expertisées est utilisée pour comparer les résultats prédits par le système de RN avec ceux des expertises (résultats cibles). Des conclusions satisfaisantes ont pu être mises en évidence sur l'exactitude de la prédiction de la vulnérabilité.

Mots clés:

Vulnérabilité, Intelligence Artificielle, Réseaux de Neurones, Taux d'endommagement

ABSTRACT

To estimate the after-effects of earthquakes on buildings, it is desirable to control the standards that affect the seismic vulnerability of buildings. The ability to measure more accurately the seismic vulnerability of buildings today is one of the most important challenges faced by structural engineers. The results of such studies are important in reducing human and material losses in future earthquakes, while allowing actions to strengthen existing structures and better management of post-seismic crisis.

In this context, the work presented here describes an approach using Neural Networks (RN) as a tool to assess the vulnerability of a building. Indeed, an RN system, plus a set of constructions can be appraised in place to form a first phase of learning. In a second phase, the system can be used to predict the vulnerability of another group of buildings.

For the cases we deal with a base of 130 cases of buildings appraised is used in architecture RN to form the learning phase by the software MATLAB 7.8. The parameters describing these constructions are chosen in different ways to contain all possible cases.

Indeed, another database of 11 cases of buildings is used to compare the results predicted by the system with those of RN expertise (performance targets). Satisfactory conclusions have been highlighted in relation to the accuracy of the prediction of vulnerability.

Keys words:

Vulnerability, Artificial Intelligence, Neural Network, Rate of damage

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Dieu (ALLAH), qui m'a donné le courage et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier ici toutes les personnes et l'ensemble des enseignants, à l'institut de Génie Civil de l'université S.D de Blida, et particulier l'ensemble des enseignants de post de graduation qui ont contribué directement et indirectement au bon déroulement de ces trois années (et quelque) de magistère.

En tout premier lieu je tiens à remercier mon encadreur Mr. M.ABED professeur à l'université S.D de Blida, qui a encadré et soutenu mon travail de thèse. La réussite de ce travail est en grande partie due à la liberté de travail qu'il m'a accordé, son enthousiasme, et sa patience, ainsi qu'à ses compétences scientifiques.

En second lieu, j'aimerais remercier les membres du jury pour avoir accepté de juger mon travail :

- Mr. N.BOURAHLA, professeur à l'université S.D de Blida, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance ;
- Mr. M.BENSAIBI, professeur à l'université S.D de Blida, et Mr. D.AMAR-BOUZID Maître de conférences à l'Université de Média d'avoir accepté d'être examinateur lors de ma soutenance.

Merci enfin et surtout à toute ma famille, mon père, ma mère, mes frères et bien sûr ma femme et ma petite fille Alâe, pour leurs soutiens permanents et à tous ceux qui m'ont aidés pour accomplir cette tâche.

TABLE DES MATIÈRES

ملخص.....	1
RÉSUMÉ.....	2
ABSTRACT.....	3
REMERCIEMENT.....	4
TABLE DES MATIÈRES.....	5
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX.....	8
INTRODUCTION.....	11
Objectifs et motifs de l'étude.....	15
Plan de travail.....	16
CHAPITRE 1 : LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES CONSTRUCTIONS.....	17
1.1 Introduction.....	17
1.2 Vulnérabilité sismique.....	18
1.3 Principe des méthodes existantes.....	19
1.3.1 Méthode "FEMA310".....	20
1.3.2 Méthode " ATC 40 ".....	21
1.3.3 Méthode AFPS.....	21
1.3.4 L'échelle macrosismique européenne EMS98.....	22
1.3.5 Guide HAZUS 99.....	25
1.3.6 Méthodologie RISK-UE.....	26
1.3.7 La méthode du GNDDT.....	28
1.3.8 Méthode de l'indice de vulnérabilité en Algérie.....	30
1.3.9 Méthode Vulneralp.....	32
1.4 Conclusion.....	33

CHAPITRE 2 : APPROCHE ADOPTÉE POUR L'ESTIMATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES CONSTRUCTIONS.....	35
2.1 Introduction	35
2.2 Principe de l'approche proposée	35
2.2.1 Définitions des paramètres choisis et leurs classifications	37
2.2.2 Classification des paramètres choisis	42
2.2.3 Classification de la structure.....	43
2.3 Conclusion	44
CHAPITRE 3 : L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LES RÉSEAUX DE NEURONES (RNs)	45
3.1 Introduction	45
3.2 L'intelligence artificielle (IA)	45
3.3 Les réseaux de neurones (RNs) et leurs applications.....	48
3.3.1 Historique	48
3.3.2 Neurone biologique	49
3.3.3 Neurone formel	50
3.3.4 Principe de fonctionnement général.....	52
3.4 Architecture des réseaux de neurones	53
3.4.1 Les réseaux non boucles.....	53
3.4.2 Les réseaux boucles.....	54
3.5 L'Apprentissage des réseaux de neurones.....	55
3.5.1 Apprentissage non supervisé.....	56
3.5.2 Apprentissage par renforcement.....	56
3.5.3 Apprentissage supervise	57
3.5.4 Préapprentissage	58
3.5.5 Apprentissage continu.....	58
3.5.6 La règle HEBB	58
3.5.7 Loi de HOP FIELD	59
3.5.8 Loi de DELTA	59
3.5.9 Le perceptron	60
3.5.10 L'ADALINE.....	60
3.6 Le perceptron multicouches (MLP)	62
3.6.1 Structure du réseau RPG	62
3.6.2 Algorithme de la retropropagation du gradient d'erreur	63
3.7 Les étapes de la conception d'un réseau.....	66
3.7.1 Choix des échantillons	66

3.7.2	Élaboration de la structure du réseau.....	66
3.7.3	Apprentissage.....	66
3.7.4	Validation	67
3.8	Propriétés et problèmes du RNs.....	67
3.8.1	Problème des valeurs initiales des poids du réseau	67
3.8.2	Problème de sur apprentissage.....	67
3.8.3	Problème de réglage du pas d'apprentissage	67
3.9	Conclusion	68
 CHAPITRE4 : APPLICATION DES RÉSEAUX DE NEURONES POUR L'ESTIMATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES CONSTRUCTIONS		69
4.1	Introduction	69
4.2	Méthodologie.....	69
4.3	Base de données du RNs.....	71
4.4	Architecture du réseau de neurone linéaire ADALINE	71
4.5	Langage de Programmation.....	73
4.5.1	NETWORK DATA MANAGER.....	73
4.5.2	L'algorithme d'apprentissage	78
4.6	Apprentissage du réseau neurone ADALINE.....	78
4.6.1	Performance des résultats	78
4.7	Architecture du réseau de neurone RPG	80
4.7.1	Effet du nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans la couche cachée.....	81
4.7.2	Performance des résultats	82
4.8	Comparaison entre le RNs (RPG) et le RNs (ADALINE)	83
4.9	Validation du réseau RPG	84
4.10	Conclusion.....	87
 CONCLUSION.....		88
 APPENDICES		91
 RÉFÉRENCES		120

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 : Classes de vulnérabilité de l'EMS 98	23
Figure 1.2 : Illustrations des niveaux de dommages de l'EMS98	24
Figure 1.3 : Description des indicateurs de l'EMS-98	24
Figure 1.4 : Courbes de dégâts typiques pour une classe de vulnérabilité (EMS-98)	25
Figure 2.1 : Classifications des constructions selon les fiches d'évaluation des dommages	43
Figure 3.1 : Schéma simplifié d'un neurone	50
Figure 3.2 : Neurone formel	50
Figure 3.3 : Fonctions d'activations	51
Figure 3.4 : Mise en correspondance neurone biologique /neurones artificiel	52
Figure 3.5 : Réseau non bouclé	54
Figure 3.6 : Réseau bouclé	54
Figure 3.7 : Principe d'apprentissage	60
Figure 3.8 : Présentation des écarts entre $d(k)$ et $y(k)$	61
Figure 3.9 : Algorithme de Rétro propagation	63
Figure 4.1 : Méthodologie de développement du réseau de neurones	70
Figure 4.2 : Architecture du réseau de neurone linéaire adapté (ADALINE)	71
Figure 4.3 : La fonction de transfert linéaire (<i>purelin</i>)	72
Figure 4.4 : Panneau principale de NETWORK/DATA MANAGER	74
Figure 4.5 : Panneau de commande pour la création du RNs	75

Figure 4.6 : Panneau de commande pour l'apprentissage du RNs	76
Figure 4.7 : Panneau de visualisation de l'apprentissage du réseau de neurone	77
Figure 4.8 : Évaluation de l'erreur par RN linéaire (ADALINE)	79
Figure 4.9 : Comparaison de la sortie donnée par le RN (ADALINE) et la sortie ciblée	79
Figure 4.10 : Architecture du réseau RPG adapté	80
Figure 4.11 : Évaluation de l'erreur par le RPG	82
Figure 4.12 : Comparaison de la sortie donnée par le RN (RPG) et la sortie ciblée	83
Figure 4.13 : Panneau principale de NETWORK DATA MANAGER pour la simulation	85
Figure 4.14 : Panneau de simulation	86
Figure 4.15 : Fenêtre de visualisation de la sortie calculée par le RNs (RPG)	86

Tableau 1.1: Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie d'après le GNDT	29
Tableau 1.2: Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en béton armé d'après le GNDT	29
Tableau 1.3: Classe de vulnérabilité, scores et pondérations des différents critères structuraux (constructions en maçonnerie), d'après le GNDT	30
Tableau 1.4: Éléments de calcul de l'indice de vulnérabilité en Algérie	31
Tableau 2.1: Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en béton armé	37
Tableau 2.2: Classe de vulnérabilité des différents critères structuraux	43
Tableau 4.1: Description des boutons et listes du panneau de NETWORK/DATA MANAGER	74
Tableau 4.2: Résumé de l'effet du nombre de couche caches et le nombre de neurone sur la convergence du réseau RPG	81
Tableau 4.3: Comparaison de la régression linéaire multiple par l'ADALINE et le coefficient de régression du modèle de réseau de neurone RPG	84
Tableau 4.4: Les paramètres d'estimation de la vulnérabilité et la sortie cible des constructions choisis pour la validation	85
Tableau 4.5: Comparaison de la sortie cible et la sortie calculée par le RN	87

INTRODUCTION

Lorsque survient un tremblement de terre, la surface de la Terre se déplace horizontalement et verticalement, de quelques centimètres à quelques décimètres selon l'intensité du séisme. Ces mouvements se produisent généralement à la jonction des plaques tectoniques, là où elles entrent en collision ou bien se frottent les unes contre les autres. Il peut également s'agir de mouvements le long d'anciennes fractures ou zones de faiblesse de l'écorce terrestre.

Les dommages directs causés par un séisme proviennent soit du mouvement de la faille ou des vibrations du sol. Ces dernières sont responsables de la majorité des dommages causés aux structures. Selon la nature des oscillations (amplitude, fréquence, durée) et de la construction (genre, mode), les constructions subissent des dégâts qui peuvent aller jusqu'à l'effondrement complet. Les pertes encourues résultant de ces dommages sont économiques, sociales et aussi humaines. Le séisme de mai 2003 à Boumerdes et celui d'octobre 1980 à Chelif en Algérie en sont malheureusement des exemples probants. Le séisme de Bourmedes, d'une magnitude de 6,8 sur l'échelle de Richter, s'est soldé par plus de 2000 morts et plus de 10000 blessés [1]. Les dommages sévères aux structures dans les régions urbaines ont fait plus de 15000 [1] sans abri.

Les pertes encourues lors de ces différents événements, surtout dans les zones densément peuplées, ont mis en évidence la nécessité de réduire les dommages potentiels des structures existantes (infrastructures et bâtiments) et d'évaluer leur vulnérabilité aux séismes.

L'estimation des pertes encourues, allant de l'interruption de service aux pertes en vie humaine, est un champ d'expertise en plein développement. Il s'agit d'une préoccupation

importante pour les régions du monde où la probabilité d'occurrence de séisme de forte intensité est beaucoup plus élevée qu'ailleurs, mais aussi pour les régions moins sensibles, mais densément peuplées. La connaissance du risque sismique permet de mettre en place des mesures de mitigation pour diminuer les dommages potentiels tout en considérant la variable économique de l'équation.

On peut définir le risque par «un danger éventuel plus ou moins prévisible ». Le risque est donc relié à la possible réalisation d'évènements non désirés. Il prend en compte non seulement la probabilité d'occurrence de tels évènements, mais aussi l'importance de leurs conséquences. On peut exprimer le risque sismique par la convolution de l'aléa sismique, de la vulnérabilité du bâti, et des pertes matérielles et humaines. Le risque, ainsi défini, s'exprime généralement en termes économique et social selon différents scénarios de séismes.

La vulnérabilité du bâti existant est probablement l'aspect de l'évaluation du risque sismique qui intéresse le plus les ingénieurs car elle dépend principalement des caractéristiques structurales et des déficiences qui leurs sont associées. On peut considérer qu'il y a deux grandes méthodes pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments :

1. Les études statistiques basées sur les dommages observés lors de séismes passés et qui permettent d'obtenir des matrices de dommages probables associées à une classe de bâtiment. Ces matrices servent ensuite à développer des fonctions de vulnérabilité donnant pour un type de bâtiment la probabilité qu'un certain degré d'endommagement survienne en fonction de l'intensité d'un séisme. La valeur des résultats est essentiellement probabiliste.
2. Les simulations par modèles numériques ou analytiques permettant d'obtenir la réponse d'une structure à un ou plusieurs scénarios de séismes. Les résultats sont généralement valables pour un bâtiment particulier.

Dans le cas de l'estimation des dommages causés par un séisme, les variables concernées par l'étude incluent la localisation des fissures, leur forme, ouverture, proportion, etc. Dans le cas de l'étude de vulnérabilité, ces variables incluent les caractéristiques géométriques (régularité en plan ou en élévation), structurelles (répartition des masse/rigidités) et

d'autres, relative à la construction telle que le type de matériau, l'état de dégradation, la présence ou pas de chaînage, etc.

Ce travail propose une approche simple pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé, basée sur des méthodes d'analyse de la vulnérabilité, développées dans des pays à forte sismicité et sur des fiches d'évaluations des dommages des différentes régions en Algérie.

Vu la nature des facteurs responsables des dommages causés par un séisme, il s'avère très difficile d'estimer avec précision la vulnérabilité ou le taux d'endommagement des constructions. Les différentes techniques (Systèmes Experts, la Logique Floue, les Réseaux de neurones, le Raisonnement par Cas, etc.) peuvent être le diagnostic pour notre problème posé.

Les réseaux de neurones sont appliqués dans plusieurs domaines avec succès et ont été aussi utilisés dans des travaux de recherches récents dans le domaine du génie civil. Il semble donc approprié d'utiliser cette méthode pour modéliser un problème complexe tel que l'estimation de la vulnérabilité des constructions.

Un réseau de neurones est un processeur distribué massivement parallèle qui a une propension naturelle pour emmagasiner la connaissance expérimentale et la rendre disponible pour une utilisation ultérieure. Il est analogue au cerveau sur deux aspects:

1. La connaissance est acquise par le réseau à travers un processus d'apprentissage.
2. Les forces de connexion inter-neurones appelées poids synaptiques sont utilisées pour l'emmagasinage de l'information.

L'utilisation des réseaux de neurones offre les caractéristiques intéressantes suivantes:

- Nonlinéarité : Le neurone élémentaire est un dispositif non-linéaire. Conséquemment, l'interconnexion de plusieurs neurones ensemble résulte en un système global lui-même non-linéaire. Cette propriété importante permet l'emploi des réseaux de neurones pour la modélisation de systèmes où existent des non-linéarités inhérentes.
- Relation d'entrée/sortie : Un paradigme populaire d'apprentissage est l'entraînement supervisé qui consiste à présenter au réseau des exemples d'apprentissage.

Chaque exemple comporte un paramètre d'entrée et une sortie désirée. Les poids synaptiques sont modifiés de façon à minimiser l'erreur entre la réponse voulue et la réponse effective du réseau. En alimentant le réseau avec plusieurs exemples et en répétant plusieurs fois, il finit par se stabiliser et converger. Le réseau construit donc progressivement une représentation implicite de la relation entrée/sortie.

Objectifs et motifs de l'étude

L'objectif principal de notre étude est le développement et la validation d'une nouvelle technique pour l'établissement « d'un système intelligent » pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé et de fournir des estimations proches des valeurs réelles en utilisant les réseaux de neurones.

Notre approche d'estimation de la vulnérabilité des constructions est basée sur la méthode de la GNDT [2] [3], EMS98 [4] et sur des fiches d'évaluation des dommages dans différentes régions en Algérie. Cette approche permet d'estimer le degré d'endommagement des constructions, puis d'effectuer leur classification par les réseaux de neurones.

Pour cela, une application de simulation des réseaux de neurones développées par le logiciel MATLAB 7.8 [5], appelé NETWORK/DATA MANAGER [5] est utilisée pour créer le meilleur réseau pour notre étude. Ceci est réalisé en étudiant l'effet de différents paramètres utilisés dans la construction du réseau de neurones.

Ce travail vise deux objectifs principaux qui sont :

- Exploration de l'efficacité des réseaux de neurones dans l'application de l'évaluation de la vulnérabilité sismique pour les constructions.
- Mise au point d'un nouvel outil pour l'estimation du degré de dommages des constructions en béton armé.

Plan de travail

Ce travail de thèse est développé en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente les méthodes d'estimation de vulnérabilité sismique des villes ou des constructions individuelle les plus utilisées dans le monde et en Algérie.

Le deuxième chapitre expose l'approche adoptée pour notre étude : nous avons proposé une approche d'estimation de la vulnérabilité des constructions basée sur la méthode de GNDT [2] [3], sur l'EMS98 [4] et sur la méthode de l'indice de vulnérabilité en Algérie par BENSAÏBI [13] [14] à l'aide des fiches d'évaluations des dommages appliquées dans différentes régions en Algérie.

Le troisième chapitre décrit les principes fondamentaux des réseaux de neurones, leurs fonctions, leurs organisations générales, leurs composants de base, structures, caractéristiques, avantages et limitations.

Le quatrième chapitre expose la méthodologie de l'étude, l'application des modèles de réseau de neurones de rétropropagation et les réseaux linéaires pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions (architecture, programme, apprentissage, etc.). Puis présente l'effet des facteurs de conception des réseaux (nombre de couches et nombre de neurones cachés). En outre, une évaluation comparative entre les réseaux de neurones à rétropropagation et les réseaux linéaires (régression linéaire multiple) a été trouvée. À la fin de ce chapitre, une partie de la base des données qui ne portaient pas à l'ensemble de données d'apprentissage, sera utilisée pour la validation, et évaluer une comparaison entre les résultats prédits par le système de RNs et ceux des expertises (résultats cibles).

Le cinquième chapitre présente la conclusion générale et quelque recommandation pour les futures.

CHAPITRE 1

LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES CONSTRUCTIONS

1.1 Introduction

L'efficacité d'un plan d'urgence ou de réponse à un séisme vient du fait que les bâtiments puissent être capables de résister à un effondrement en cas de secousse. En ce sens, le risque sismique dans une certaine zone est lié au comportement de nos structures.

En général, le risque sismique se caractérise par sa variation dans le temps et dans l'espace, il est fonction non seulement de la zone de sismicité mais aussi de la densité de la population, du niveau du développement économique et des moyens mis en œuvre pour résister à une crise post-sismique. Naturellement, la catastrophe serait d'autant plus grande que le séisme est plus ou moins proche d'un centre urbain, ou bien que son intensité soit plus ou moins importante, tout comme la densité de la population et le niveau social de la ville. Cela représente donc plusieurs facteurs à considérer.

Les mesures de prévention contre les effets d'un possible désastre sismique doivent être prises en considération de la part des collectivités territoriales ou locales. Ces mesures auraient pour objectif la réduction du risque sismique, et empêcher un impact négatif qu'aurait un tremblement de terre sur le développement économique.

Tous les centres urbains situés dans des zones de sismicité importante sont sujets à de tels risques en cas d'un séisme. La connaissance de ces risques est primordiale à l'heure d'établir un plan d'urgence. C'est pourquoi la vulnérabilité sismique des bâtiments existants joue un rôle important puisque c'est à partir de cette étude que des mesures et un plan d'urgence pourraient être établis. Une étude de la vulnérabilité sismique des bâtiments doit permettre l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque de la résistance des bâtiments

mais aussi doit permettre d'estimer l'impact qu'aurait la dégradation de tel ou tel bâtiment si celui-ci fait parti des bâtiments dits « stratégiques ».

Les objectifs de ce chapitre visent en premier lieu à établir une revue de l'état des connaissances sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique pour un ensemble de bâtiments et en second lieu à établir la situation des constructions Algérienne dans ce domaine par une approche d'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé.

1.2 Vulnérabilité sismique

Si l'on se réfère à la terminologie proposée par l'UNDRO (Office of the United Nations Disasters Relief Coordinator) [6] on entend par aléa sismique, la probabilité d'occurrence d'un évènement en termes d'intensité, au cours d'une période de référence, une secousse sismique atteigne ou dépasse en ce site une certaine valeur.

On entend par risque sismique le degré de pertes, de destructions ou de dégâts sur une période de référence (en général un an) sur une région donnée. Les pertes se réfèrent aux vies humaines et aux biens exposés.

On définit la vulnérabilité sismique par le degré d'endommagement pour différents évènements. La vulnérabilité dépend des caractéristiques physiques et géométriques des bâtiments.

Finalement on peut exprimer la vulnérabilité comme la capacité de réponse d'une structure, ici d'un bâtiment, à une sollicitation sismique donnée. Elle est fonction de nombreux paramètres physiques, comme par exemple le matériau de construction utilisé, les périodes de vibration fondamentales ou encore la géométrie en plan ou en élévation de l'ouvrage. Cette vulnérabilité revêt un caractère essentiel pour le risque sismique, puisque c'est principalement cette composante de l'équation du risque que va pouvoir modifier l'ingénieur. Il est courant de différencier dans l'étude de la vulnérabilité les nouvelles constructions, pour lesquelles une modification de la structure porteuse est relativement aisée et impacte faiblement le coût du bâti existant, qui doit être évalué en l'état et dont une modification nécessite fréquemment des interventions délicates et onéreuses.

1.3 Principe des méthodes existantes

Les méthodes permettant d'évaluer la vulnérabilité sismique, ont été établies selon des observations faites après que le séisme ait eu lieu. De ce fait, la plupart des méthodes ont été publiées dans des pays à forte sismicité (USA, Japon, Turquie, Italie,...).

Ces méthodes se fondent sur l'observation des caractéristiques structurales des bâtiments pour leur attribuer un indice de vulnérabilité (IV). Différents niveaux de précision d'analyse sont généralement prévus, selon les informations disponibles, qui conduisent à une qualité variable de l'estimation de la vulnérabilité. Ces méthodes proposent une relation reliant l'indice de vulnérabilité à une échelle de dommage pour un mouvement sismique donné, un scénario probable ou un séisme historique, par exemple.

Les paramètres pertinents, les coefficients qui leurs sont attribués dans le calcul de l'indice de vulnérabilité (IV) et le lien entre IV et les dommages sont déterminés à partir du retour d'expérience réalisé par des experts lors de missions post-sismique. Malheureusement, le mouvement du sol qui a généré les dégâts observés n'est généralement pas connu car il n'a pas été enregistré.

Des méthodes d'évaluation diverses ont été élaborées. Les méthodes présentées visent chacune un objectif, donc également un besoin différent. Le but de cette présentation est d'illustrer la grande diversité des approches, parmi ces méthodes nous avons :

1.3.1 Méthode "FEMA310"

Présentée sous forme de guide, cette méthode de la « Federal Emergency Management Agency américaine [7] », datant de 1998, constitue une prénorme.

Elle est le résultat de mises à jour de méthodes antérieures, intégrant les enseignements des études post-sismiques récentes.

L'évaluation est systématiquement faite par rapport à deux niveaux de performance :

- sauvegarde des vies humaines (SVH),
- fonctionnalité immédiate (FI).

Trois niveaux d'évaluation sont proposés.

- Niveau 1 : Présomption de vulnérabilité

Cette évaluation concerne tous les types de bâtiments et vise à identifier ceux qui n'atteignent pas le niveau de performance requis. L'état de la construction est examiné à l'aide d'une série de " check-lists " (Annexe B) détaillées dans le guide et portant sur la structure, les éléments non structuraux et l'interface sol/fondations. Si des points vulnérables sont détectés, on peut décider de procéder à l'évaluation du niveau 2 ou de se satisfaire des résultats obtenus.

- Niveau 2 : Analyse quantitative

Cette analyse consiste à appliquer une méthode de calcul élastique linéaire simplifiée aux bâtiments désignés comme non conformes au niveau 1. L'objectif est d'identifier les constructions qui ne nécessitent pas de réhabilitation, ainsi que celles qui présentent une réelle vulnérabilité. Un tableau (Annexe B) précise, en fonction du nombre de niveaux, les types de construction nécessitant une analyse de niveau 2 ou éventuellement de niveau 3, même s'ils ont été considérés comme conformes au niveau 1.

- Niveau 3 : Analyse approfondie

Les évaluations aux niveaux 1 et 2 étant assez conservatrices en raison de l'approche simplifiée, l'analyse du niveau 3 vise à une évaluation précise qui ne se justifie que dans des cas spécifiques.

L'ensemble des démarches préconisées sont résumé dans un organigramme (Annexe B).

1.3.2 Méthode "ATC 40 "

Cette méthode, conçue pour les constructions de béton armé, publiée aux États-Unis en 1986 par Applied Technology Council [8], est innovante par rapport aux approches classiques. La capacité d'atteindre un niveau de performance est évaluée en termes de déplacements et non en termes de forces, car lors des déformations post-élastiques, l'importance des dommages est davantage fonction des déplacements que des forces.

La vulnérabilité est évaluée pour les mêmes niveaux de performance que dans la méthode " FEMA 310" [7] : sauvegarde des vies humaines (SVH) et fonctionnalité immédiate (FI),

par une méthode de calcul statique non linéaire. Des courbes de capacité de déplacement (donc de déformabilité) sont tracées pour les bâtiments étudiés. Elles dépendent des caractéristiques de ces derniers et non pas d'une agression sismique. Les différents degrés de dommages correspondant aux déplacements sont localisés sur une courbe (Annexe C).

La méthode « ATC 40 » [7] a suscité un grand intérêt dans le monde entier. Toutefois, elle n'est accessible qu'aux spécialistes, car le type de calcul utilisé pour déterminer les courbes de capacité de déplacement est peu courant (calcul statique).

1.3.3 Méthode AFPS

La Méthode « AFPS » proposée par le groupe de travail " Vulnérabilité du bâti existant " de l'Association Française du Génie Parasismique [9] est applicable aux bâtiments construits depuis 1960. Deux niveaux d'évaluation sont visés. Le premier consiste en une approche qualitative et le second en une vérification quantitative.

- Niveau 1 : approche qualitative

Une grille de relevé détaillée doit être remplie lors d'une inspection extérieure et intérieure du bâtiment étudié. L'évaluation est faite à l'aide d'un tableau d'évaluation, dans lequel une cote (coefficient de pénalité) est attribuée aux divers facteurs de vulnérabilité (Annexe D). Ces cotes permettent de calculer un coefficient K variant de 0 à 100. Selon la valeur de K, on conclut sur une présomption de :

- très forte vulnérabilité, $K > 100$
- forte vulnérabilité, $50 < K < 100$
- moyenne vulnérabilité, $25 < K < 50$
- faible vulnérabilité, $10 < K < 25$
- très faible vulnérabilité, $K < 10$

- Niveau 2 : approche quantitative

L'évaluation est faite pour trois niveaux d'agression sismique (séisme faible, séisme moyen et séisme fort). Par une des méthodes d'analyse suivantes, choisie en fonction des critères de régularité figurant dans les règles PS 92 :

Il est également procédé à la vérification de la stabilité au renversement, de la stabilité interne et de la résistance des éléments porteurs.

En recensant tous les facteurs de vulnérabilité établis qualitativement et en examinant les résultats d'une analyse quantitative, on établit une évaluation de la vulnérabilité en plaçant une croix dans la case appropriée sur un tableau (Annexe D).

1.3.4 L'échelle macrosismique européenne « EMS98 »

Les échelles macrosismiques sont des fonctions de vulnérabilité basées sur l'observation de la vulnérabilité lors de séismes passés et sur le jugement d'experts. L'objectif premier de ces échelles est de mesurer la gravité d'une secousse sismique en fonction des effets observés dans une zone limitée mais elles peuvent également être utilisées pour des études de vulnérabilité.

L'Échelle Macrosismique Européenne [10] (GRÜNTHAL, 1998) contient 12 intensités évaluées à partir des dommages observés sur les bâtiments et l'effet des secousses sur les gens et l'environnement. Créée en 1992 sous la recommandation de la XXIII^{ème} Assemblée générale de la Commission Sismologique Européenne et révisée en 1998, elle se distingue des échelles existantes, comme l'échelle MSK qui lui a servi de point de départ, par l'utilisation des classes de vulnérabilité et des structures calculées.

On distingue 15 types de structures auxquelles on assigne la classe de vulnérabilité la plus probable parmi un total de six classes. L'attribution de la classe la plus probable est généralement faite à partir d'opinion d'experts. Cette classification est donnée sur la figure 1.2.

Type de structure	Classe de vulnérabilité						
	A	B	C	D	E	F	
MAÇONNERIE	Moellon brut, pierre tout venant	○					
	Brique crue (adobe)	○	—				
	Pierre brute	○	—				
	Pierre massive		○	—			
	Non renforcée, avec des éléments préfabriqués		○	—			
	Non renforcée, avec des planchers en béton armé		○	—			
	Renforcée ou chaînée			○	—		
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique (CPS)			○	—		
	Ossature avec un niveau moyen de CPS			○	—		
	Ossature avec un bon niveau de CPS				○	—	
	Murs sans CPS			○	—		
	Murs avec un niveau moyen de CPS			○	—		
	Murs avec un bon niveau de CPS				○	—	
ACIER				○	—		
BOIS				○	—		

○ Classe de vulnérabilité la plus probable; — Intervalle probable;
 Intervalle de probabilité plus faible, cas exceptionnels

Figure 1.1 : Classes de vulnérabilité de l'EMS 98

Afin de définir l'intensité sismique correspondant à une secousse, on utilise les dommages observés sur les différentes classes de vulnérabilité de structures (voir figure). Cinq degrés de dommages sont considérés et peuvent se résumer ainsi :

- Degré 1 : Dommages négligeables à légers (pas de dommages structuraux et de légers dommages non structuraux),
- Degré 2 : Dommages modérés (légers dommages structuraux et dommages non structuraux modérés),
- Degré 3 : Dommages importants à lourds (dommages structuraux modérés et lourds dommages non structuraux),
- Degré 4 : Très lourds dommages (lourds dommages structuraux et très lourds dommages non structuraux),

- Degré 5 : Destruction (très lourds dommages structuraux).

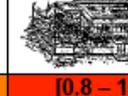
Echelle EMS98	1	2	3	4	5
Structure en maçonnerie					
Structure en béton armé					
Damage moyen	[0.0 – 0.2[[0.2 – 0.4[[0.4 – 0.6[[0.6 – 0.8[[0.8 – 1.0[

Figure 1.2 : Illustrations des niveaux de dommages de l'EMS98

L'EMS 98 [10] propose une corrélation entre l'intensité sismique et l'endommagement des bâtiments. Elle utilise pour ce faire des indicateurs du type «un peu », «beaucoup » et « la plupart ». Par exemple, l'intensité EMS VII se décrit comme VII dégâts :

- La plupart des personnes sont effrayées et essaient de se précipiter dehors. De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à se tenir debout, en particulier aux étages supérieurs.
- Les meubles sont déplacés et les meubles dont le centre de gravité est élevé peuvent se retourner. Les objets tombent des étagères en grand nombre. Les récipients, les réservoirs et les piscines débordent.
- De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A subissent des dégâts de degré 3, quelques-uns de degré 4.
De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B subissent des dégâts de degré 2, quelques-uns de degré 3.
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité C subissent des dégâts de degré 2.
Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 1.

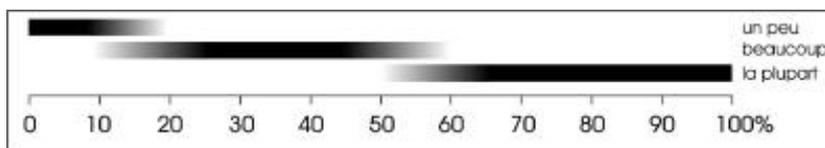
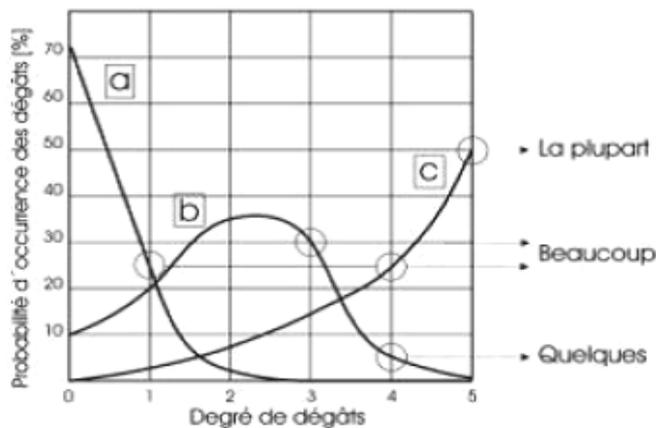


Figure 1.3 : Description des indicateurs de l'EMS-98

La description des dégâts à une certaine intensité mentionne généralement le degré de dégât le plus élevé auquel on peut s'attendre. Dans un cas idéalisé, on peut considérer que

la distribution des dégâts entre les différents degrés pour des bâtiments de même vulnérabilité, soumis à la même intensité, est une distribution normale autour de la moyenne des dégâts du degré. Les degrés de dégâts de l'échelle EMS 98 sont une représentation discrète d'un continuum de degrés possibles de dégâts. La Figure 1.4 illustre les courbes de dégâts qu'on obtiendrait pour une classe de vulnérabilité donnée [10].



○ Point d'intersection entre des fonctions types de probabilité de dégâts et des degrés de dégâts provenant de la classification des degrés d'intensité

Niveau d'intensité

a) I = VI b) I = VIII c) I = X

Figure 1.4 : Courbes de dégâts typiques pour une classe de vulnérabilité (EMS-98)

Ces courbes de dégâts peuvent être définies pour chaque classe de vulnérabilité, ainsi que pour des constructions différentes à celles décrites dans l'EMS-98, et éventuellement servir à des études d'estimation des dégâts potentiels.

1.3.5 Guide HAZUS 99

Édité par l'agence américaine « Fédéral Emergency Management Agency » (FEMA) [11], ce guide présente une méthode d'évaluation de la vulnérabilité à l'échelle urbaine. Le but est de permettre une estimation des pertes qu'une zone ou région pourrait subir lors d'un tremblement de terre.

La méthodologie a été élaborée par une équipe composée de scientifiques, ingénieurs, architectes, économistes, planificateurs, sociologues et informaticiens. Ainsi, le guide couvre une large gamme de thèmes et disciplines, notamment les sciences de la terre, génie

parasismique et sciences économiques et sociales. Les méthodes utilisées ont été validées à l'occasion de séismes récents et soumises à l'avis d'experts reconnus.

Le guide comprend un manuel technique en trois volumes, qui s'adresse aux lecteurs possédant un certain niveau technique, et un guide plus sommaire en deux volumes, accompagné d'un logiciel, présentant la méthodologie d'une manière plus accessible aux non-spécialistes.

La méthode permet d'élaborer aussi bien des évaluations sommaires que des estimations détaillées, nécessitant une approche sophistiquée. Un diagramme qui montre les domaines traités dans un guide (voir Annexe E).

Chaque pavé correspond à un chapitre qui propose une méthode d'évaluation des pertes en fonction de la vulnérabilité. Des méthodes standardisées sont proposées pour :

- sélection des scénarios de tremblements de terre,
- collecte des données,
- utilisation de bases de données géotechniques (type de sol, mouvement sismique, rupture de sol, etc.),
- évaluation de l'occupation des logements et des lieux de travail,
- typologie des bâtiments,
- typologie des dommages,
- élaboration des fonctions de vulnérabilité,
- typologie et analyse des réseaux urbains,
- évaluation des coûts,
- interprétation des résultats compte tenu des incertitudes liées à la fiabilité des données et à la modélisation.

1.3.6 Méthodologie RISK-UE

Le projet RISK-UE [12], est un projet d'évaluation du risque sismique à l'échelle européenne. L'étude a débuté en Janvier 2001, et s'est étalée sur une période de trois ans. Elle a été pilotée par des institutions universitaires et des organismes de recherches, et a abouti à une méthodologie d'analyse du risque sismique du bâtiment existant et historique en Europe.

Sept villes ont fait l'objet de l'étude: Nice (France), Barcelone (Espagne), Catania (Italie), Sofia (Bulgarie), Bucarest (Roumanie), Thessalonique (Grèce) et Bitola (Macédoine). La méthodologie s'est basée sur l'établissement d'un inventaire complet de tous les éléments à risque.

Le programme Risk-UE comporte deux niveaux d'évaluation :

- Niveau 1, qui repose sur une analyse dite « macrosismique », basée sur des retours d'expérience post-sismique ;
- Niveau 2, qui est basée sur une analyse mécanique du comportement d'une structure face à une agression sismique sous forme d'un spectre d'accélération.

Dans un premier temps il s'agit de quantifier par une valeur numérique, l'indice de vulnérabilité V_i , la vulnérabilité d'un type de bâtiment qui s'exprime de manière qualitative dans l'EMS98 [4]. Les valeurs de cet indice sont comprises entre 0 (non vulnérable) et 1 (très vulnérable).

Cet indice permet le calcul d'un taux de dommage moyen μ_D , en fonction de l'intensité macrosismique I et de l'indice de vulnérabilité V_i selon l'équation suivante :

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{1 + 6.25V_i - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad 1.1$$

μ_D , un nombre variant entre 0 et 5 et balayant de façon continue les niveaux de dommages D0 à D5 définis par l'échelle EMS98. $\mu_D = 0$ signifie une absence de dommages, $\mu_D = 5$ signifie un dommage D5 (destruction du bâtiment).

Par exemple [12], un bâtiment dont l'indice de vulnérabilité est $V_i = 0.9$, soumis à une intensité VIII aura un taux de dommage $\mu_D = 3$ selon le calcul de l'équation 1.1. La distribution de dommage correspondante est illustrée dans l'Annexe F.

Un type de bâtiment ne correspond pas à un indice de vulnérabilité V_i fixe mais plutôt à une fourchette d'indice centrée autour d'une valeur la plus probable notée V_i^* , comprise entre des valeurs V_i min et V_i max. On définit aussi des bornes V_i^- et V_i^+ , plus restrictives que V_i min et V_i max, correspondant aux valeurs plausibles de V_i . Des valeurs de V_i ont été définies pour 23 types principaux de bâti. Elles sont représentées dans l'Annexe F.

La typologie d'un bâtiment est d'abord identifiée par rapport à un des types du tableau de matrice des typologies de bâtiment et valeurs de V_i (Annexe F). Si le bâtiment présente des facteurs aggravants susceptibles de modifier son comportement, un facteur additif ΔV_m est rajouté à l'indice. Les exemples de facteurs correctifs pour les facteurs aggravants les plus courants sont donnés dans un tableau dans l'annexe F.

Enfin, des particularités constructives régionales peuvent être prises en compte par le rajout d'un autre facteur correctif ΔV_r .

1.3.7 La méthode du GNDT

Cette méthode est proposée pour la première fois par Benedetti et Petrini [2] en 1984 en Italie. Cette technique a été développée par la suite par le Groupe National de Défense contre les Tremblements de Terre (GNDT) du Conseil National de Recherche de l'Italie (CNR) [3]. La méthode GNDT, maintenant largement utilisée, a permis de répertorier des milliers de bâtiments à travers l'Italie (Augusti et Ciampoli, 2000) [3]. Elle comporte généralement deux niveaux d'évaluation avec un formulaire informatif et un formulaire détaillé pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé. Contrairement aux méthodes précédentes, le formulaire détaillé, ou de niveau II (Annexe G), permet de considérer les différents modes de rupture probables et des détails de construction pour les bâtiments en maçonnerie et les bâtiments en béton armé.

Dans la méthode du GNDT, deux niveaux d'analyse sont utilisés et qui traduisent la qualité et la quantité d'informations disponibles à partir du diagnostic visuel effectué par des enquêteurs. Le niveau 1 consiste à rechercher des informations générales facilement repérables sur la structure. Elles concernent la localisation de la structure, ses dimensions, son usage et son état de conservation, sa géométrie et ses matériaux de construction. Le niveau 2 caractérise de façon plus précise la structure grâce aux 11 paramètres du Tableau 1.1 et 1.2 [2].

Quand certains paramètres du niveau 2 ne peuvent être renseignés, ils sont évalués sur la base des informations de niveau 1.

Tableau 1.1 : Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie d'après le GNDT [2].

1	Type et organisation du système résistant
2	Qualité du système résistant
3	Résistance conventionnelle sous chargement horizontal
4	Localisation de la structure et fondation
5	Caractéristiques des planchers
6	Irrégularité en plan
7	Irrégularité en élévation
8	Distance entre murs
9	Caractéristiques des toitures
10	Éléments non structuraux
11	État de conservation ou maintenances

Tableau 1.2 : Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en béton armé d'après le GNDT [2]

1	Organisation du système résistant
2	Qualité du système résistant
3	Résistance conventionnelle sous chargement horizontal
4	Localisation de la structure et fondation
5	Caractéristiques des planchers
6	Régularité en plan
7	Régularité en élévation
8	Connections et éléments critiques
9	Caractéristiques des toitures
10	Éléments non structuraux
11	État de conservation ou maintenances

Le traitement statistique des données collectées dans des régions italiennes ayant subi des dommages sismiques ont permis d'attribuer des scores de vulnérabilité IV_i à chaque indicateur structural i , ainsi que le poids relatif w_i de chacun dans sa participation à la vulnérabilité de la structure (voir Tableau 1.3). Pour chaque paramètre, les enquêteurs ont attribué une valeur comprise entre A et D. La moins vulnérable (A) traduit la conformité de

ce paramètre vis-à-vis de l'intégrité de la structure, la plus vulnérable (D) traduit la situation la plus défavorable tandis que les classes B et C représentent des situations intermédiaires.

Tableau 1.3 : Classe de vulnérabilité, scores et pondérations des différents critères structuraux (constructions en maçonnerie), d'après le GNDT [2]

Paramètre	A	B	C	D	Wi
1	0	5	20	45	1.00
2	0	5	25	45	0.25
3	0	5	25	45	1.50
4	0	5	25	45	0.75
5	0	5	15	45	var
6	0	5	25	45	0.50
7	0	5	25	45	var
8	0	5	25	45	0.25
9	0	15	25	45	var
10	0	5	25	45	0.25
11	0	5	25	45	1.00

La vulnérabilité de la structure s'exprime alors comme la somme pondérée des 11 paramètres, soit :

$$IV = \sum_{i=1}^{11} IV_i w_i \quad 1.2$$

1.3.8 Méthode de l'indice de vulnérabilité en Algérie

La méthode de l'indice de vulnérabilité appliquée en Algérie par BENZAÏBI [13] [14] consiste à identifier des paramètres structuraux ou non structuraux ayant une influence sur la réponse sismique de la structure. Une fois ces paramètres identifiés, on leur affecte un coefficient pour tenir compte de leur prépondérance les uns par rapport aux autres. Cette pondération est affectée aussi par le respect ou non des règlements parasismiques lorsqu'ils existent. Cette méthode propose un tableau des paramètres dans l'estimation de la qualité sismique des constructions à Alger et la classe de chaque paramètre qui sera pondérée par un facteur de pondération, (voir Tableau 1.4) [13].

Tableau 1.4 : Éléments de calcul de l'indice de vulnérabilité en Algérie [13]

N°	Paramètres	Classes				Facteurs de pondération
		A	B	C	D	
1	Résistance totale	0	5	25	45	1.50
2	Régularité en plan	0	5	25	45	0.50
3	Régularité en élévation	0	5	25	45	0.50
4	Connexion de murs	0	5	25	45	1.00
5	Type de murs	0	5	25	45	0.25
6	Plancher	0	5	25	45	0.25
7	Toiture	0	15	25	45	0.25
8	Conditions du sol	0	5	25	45	0.75
9	Détails	0	0	25	45	0.25
10	Maintenance	0	5	25	45	1.00
11	Modifications	0	5	25	45	0.50

Chaque paramètre de nature structurale ou non structurale considéré peut avoir une influence sur la réponse sismique de la construction et ne peut prendre qu'une seule vulnérabilité, celle-ci représente la classe à laquelle appartient cette construction.

La méthode de l'indice de vulnérabilité propose quatre classes [13] : A, B, C et D. La classe A représente des constructions réalisées selon le code parasismique en vigueur et donc présente une bonne résistance au séisme, quant à la classe D, elle représente les constructions ayant une mauvaise résistance au séisme. Les classes B et C sont des classes intermédiaires. A chaque classe un coefficient de pondération est affecté. L'indice de vulnérabilité d'un élément est donc le coefficient affecté à la classe de la construction multiplié par un facteur de pondération. La somme des indices de vulnérabilité 'Iv' de tous les éléments représente l'indice de vulnérabilité de la construction.

La classification des constructions, sera associée à une couleur représentant l'état du bâti [13]. Pour des valeurs de l'indice de vulnérabilité comprises entre [0 - 35], les bâtiments sont classés vert et représentent ceux qui ne nécessitent aucune intervention, entre [35 - 250], ils sont classés orange, donc, nécessitent une intervention pour les renforcer vis-à-vis d'un séisme futur, enfin pour les valeurs comprises entre [250 - 450], ces bâtiments sont classés rouge, donc présentent une faible qualité sismique, ce qui signifie que leur remplacement s'avère indispensable.

1.3.9 Méthode Vulneralp

La méthode Vulneralp a été développée et testée à Grenoble [15]. Cette méthode se base sur la méthode italienne GDNT. Ce sont les similitudes entre les bâtis français et italiens qui ont poussé les initiateurs à se baser sur cette méthode italienne.

Le but de Vulneralp est de caractériser la vulnérabilité d'un bâtiment selon ses paramètres structuraux principaux. Ceux-ci sont choisis en fonction de leur importance vis-à-vis de la vulnérabilité sismique, ainsi que de la facilité avec laquelle ils sont repérables sur le bâtiment.

Il faut savoir que la méthode Vulneralp propose deux niveaux principaux d'analyse : le niveau 1 [15] consiste à rechercher des informations générales facilement identifiables sur la structure, tandis que le niveau 2 [15] entre déjà dans une analyse plus détaillée et nécessite donc des ressources plus importantes au niveau du recueil des données.

Le calcul se base sur le relevé de 7 paramètres structuraux [15], qui sont le matériau de construction, la régularité en plan, la régularité en élévation, l'année de construction, la forme du toit, la position de la structure par rapport aux bâtiments avoisinants et la nature du sol de fondation. Un score de vulnérabilité IV_i est attribué pour chacun de ces paramètres. Ces scores sont repris de la méthode GDNT et proviennent d'un traitement statistique des données collectées dans des régions ayant subi des dommages sismiques. Cependant, tous les paramètres n'ont pas la même importance. Le matériau de construction étant, par exemple, le paramètre le plus déterminant pour le calcul de la vulnérabilité sismique d'un bâtiment selon cette méthode. Pour traiter ce problème, les scores attribués pour chacun des paramètres sont pondérés par un poids (w_i) suivant l'importance de celui-ci. Ces pondérations sont également reprises de la méthode italienne. Étant donné que le calcul de l'indice vulnérabilité est basé sur une analyse statistique, celui-ci est toujours donné sous trois formes : la valeur moyenne et les deux valeurs extrêmes (IV_- , IV^* et IV_+).

La méthode Vulneralp [15] repose sur le relevé de sept paramètres par bâtiment étudié :

- le matériau de construction (maçonnerie, béton armé, bois, acier, terre)
- l'époque de construction (avant 1945, de 1945 à 1970, de 1970 à 2000 ou après 2000)
- la régularité en élévation (oui ou non)

- la position du bâtiment (dans une pente ou non) et la qualité du sol de fondation (rocher ou sédiments)
- la position du bâtiment dans l'îlot (isolé, en extrémité, en travée ou en coin)
- la régularité en plan (oui ou non)
- la forme du toit (terrasse ou en pente)

Finalement, l'indice de vulnérabilité est donné par la somme des scores de vulnérabilité pondérés :

$$IV = \sum IV_i w_i \quad 1.3$$

A partir de cet indice de vulnérabilité, il est intéressant de pouvoir, pour un séisme d'intensité donnée, estimer le dommage que va subir le bâtiment. A nouveau, à partir des observations post-sismiques, la méthode GDNT propose une relation entre le dommage [15], l'indice de vulnérabilité sismique et l'intensité selon l'échelle MSK. Le dommage est estimé selon la formule suivante :

$$d = 0.5 + 0.45 \cdot \arctan(0.55 \cdot (I - 10.2 + 0.05 \cdot IV)) \quad 1.4$$

avec $d > 0$

I : Intensité selon MSK,

IV : Indice de vulnérabilité sismique du bâtiment.

Ce calcul permettra, de produire des cartes de dommage pour un séisme d'intensité donné.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique et du risque sismique des bâtiments, de l'échelle d'un bâtiment individuel à celle de la ville dans son ensemble.

Les différentes approches d'évaluation de la vulnérabilité reposent généralement sur des fonctions de vulnérabilité qui expriment le pourcentage de dommages subis par un type de structure pour différentes intensités sismiques. Ces fonctions (courbes ou matrices) sont élaborées à partir de l'observation des dommages lors de séismes passés, de l'opinion d'experts ou de modèles d'analyse. L'application directe de ces fonctions ne peut

cependant pas se faire si la typologie des bâtiments à l'étude est différente de celle des bâtiments ayant servi à élaborer les fonctions de vulnérabilité.

Parmi les principales méthodes utilisées dans le monde pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique et présentées dans ce chapitre, il y a les méthodes d'attribution de pointage comme celles du FEMA et ATC40 développées aux États-Unis et qui sont largement connues depuis leurs publications mais leur utilisation impose des compétences très élevées, La Méthode AFPS proposée par le groupe de travail " Vulnérabilité du bâti existant " de l'Association Française du Génie Parasismique, l'Échelle Macrosismique Européenne EMS 98, HAZUS 99 et Risk-UE ces deux programmes permettent à l'aide de modélisations, une estimation des dommages et des dégâts sur les structures et les infrastructures ainsi que les pertes économiques indirectes face à des scénarios potentiels de catastrophes définis par l'utilisateur.

D'autres méthodes ont été développées pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions, comme la méthode GDNT développée en Italie, La méthode de l'indice de vulnérabilité appliquée en Algérie développées par Bensaïbi [13] et la méthode Vulneralp qui a été développée et testée à Grenoble, Cette méthode se base sur la méthode italienne GDNT.

Les études de vulnérabilité réalisées dans ces dernières années ont permis de développer des modèles analytiques simples pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé. L'applicabilité de ces méthodes aux bâtiments Algériens est possible à condition qu'ils soient adaptés à la typologie des bâtiments des secteurs étudiés et aux normes parasismiques.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter l'approche retenue dans notre étude pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé en Algérie.

CHAPITRE 2

APPROCHE ADOPTÉE POUR L'ESTIMATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES CONSTRUCTIONS

2.1 Introduction

La vulnérabilité caractérise la fragilité d'un élément exposé au phénomène naturel. On l'exprime par une relation entre des niveaux de dommages et des niveaux d'agression sismique. On peut distinguer une vulnérabilité physique (ou structurelle), humaine, fonctionnelle, économique, sociale, etc. On assimile le plus souvent la vulnérabilité à la résistance ou à l'endommagement d'un type d'enjeux (population, bâtiments, etc.) par rapport à la manifestation d'un phénomène naturel d'une intensité donnée.

Une construction est composée d'une ossature porteuse, la structure, et d'équipements secondaires permettant d'en assurer les fonctions principales (couverture, fermeture, séparations, circulations, matériels techniques divers, etc.). Ainsi la structure reliée au sol par les fondations doit assurer la stabilité sous l'effet de la gravité (les masses résultant de l'ensemble des équipements sont supportées par la structure), les effets associés au climat (vent, neige, variations de température) et les tremblements de terre en zone sismique.

2.2 Principe de l'approche proposée

Sur la base des méthodes d'estimation de la vulnérabilité vues au chapitre précédent, des similitudes apparaissent entre les méthodes :

- Elles définissent des niveaux d'analyse traduisant la qualité de l'estimation ;
- Elles utilisent une échelle de dommage et une classification des constructions suivant une typologie prédéfinie ;

- Elles se basent sur la recherche visuelle d'indicateurs structuraux qui modulent la vulnérabilité.

Les typologies des constructions utilisées dans cette approche sont identiques à celles détaillées dans l'EMS98 [4].

Cette partie du travail donne donc un aperçu des différents éléments qui ont été relevés par des fiches d'évaluations des dommages de différentes régions en Algérie et traite également les différents problèmes que nous avons pu rencontrer lors de cette évaluation.

Le but de notre approche est de caractériser la vulnérabilité d'un bâtiment selon ses paramètres structuraux principaux. Ces paramètres sont choisis en fonction de leur importance vis-à-vis de la vulnérabilité sismique, ainsi que de la facilité avec laquelle ils sont repérables sur le bâtiment.

Tout paramètre structural ou non structural considéré peut avoir une influence sur la réponse sismique de la construction et ne peut prendre qu'une seule vulnérabilité. Celle-ci représente la classe à laquelle appartient cette construction.

Selon les fiches d'évaluations des dommages (Annexe H) et l'échelle européenne EMS98 [4], nous proposons cinq classes :

- Classe 1 : une très bonne résistance au séisme ;
- Classe 2 : une bonne résistance au séisme ;
- Classe 3 : une moyenne résistance au séisme ;
- Classe 4 : une mauvaise résistance au séisme ;
- Classe 5 : une très mauvaise résistance au séisme.

En se basant sur les fiches d'évaluations des dommages des constructions en béton armé (Annexe F) des différentes régions en Algérie, sur la méthode GNDT [2], sur la méthode de l'indice de vulnérabilité en Algérie par Bensaïbi [13] [14] et l'EMS98 [4], nous proposons les paramètres donnés dans le tableau 2.1 pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé.

Tableau 2.1: Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en béton armé

N°	Paramètres
1	Problème de sol autour de la construction
2	Fondations
3	Infrastructure
4	Éléments porteurs (charge verticales)
5	Éléments de contreventement
6	Planchers-toiture
7	Élément non structuraux (secondaires)
8	Influence des constructions adjacentes
9	Symétrie en plan
10	Régularité en élévation

2.2.1 Définitions des paramètres choisis et leurs classifications

Les paramètres d'estimation de la vulnérabilité des constructions, sont choisis à partir des fiches d'évaluation des dommages des constructions en béton armé de différentes régions en Algérie (Annexe F). Ces paramètres sont classés en considérant les méthodes traitées au chapitre précédent.

2.2.1.1 Problème de sol autour de la construction

Ce paramètre considère différents problèmes de sol autour de la construction. Des tassements importants peuvent être la conséquence de séisme. Ils peuvent atteindre une dizaine de centimètres et être fortement préjudiciables pour tout type de construction. Et il existe un phénomène très courant lors d'un passage d'un séisme est le phénomène de liquéfaction. Les types de problèmes de sol rencontrés dans les constructions en béton armé selon les fiches d'évaluations de dommages sont :

- Glissement
- Faille
- Tassement ou soulèvement :
- Liquéfaction :

Ce paramètre est défini par deux classes :

- Classe 1 : État du sol autour de la construction est très bon ;
- Classe 5 : État du sol autour de la construction est très mauvais (tassement ou glissement).

2.2.1.2 Les Fondations

Dans ce paramètre, on trouve le type de fondation et les différents problèmes rencontrés par la structure (tassement uniforme ou glissement).

Ce paramètre est défini par deux classes :

- Classe 1 : État des fondations est très bon ;
- Classe 5 : État des fondations est très mauvais (tassement ou glissement).

2.2.1.3 Infrastructure

Ce paramètre regroupe deux types, les voiles périphériques et les poteaux avec remplissage, et est défini comme suit :

- Classe 5 (oui) : il existe des tassements ou des glissements sur les fondations, donc l'état des fondations est très mauvais ;
- Classe 1 (non) : dans cette classe, l'état des fondations est très bon.

2.2.1.4 Éléments porteurs (matériaux utilisés)

Le quatrième paramètre concerne l'élément porteur et le matériau utilisé pour la construction des contreventements (éléments verticaux). Il faut déterminer le type d'éléments utilisés (brique ou pierre naturelle). De plus, il faut également déterminer si le bâtiment est stabilisé par des refends verticaux ou par un système de cadres.

On trouve dans ce paramètre six types d'élément porteurs qui sont :

- Murs en maçonnerie ;
- Voile en béton ;
- Poteaux en béton ;
- Poteaux métalliques ;

- Poteaux en bois ;
- Autres.

La classification de ce paramètre est la suivante :

- Classe 1 : l'état des éléments porteurs est très bon ;
- Classe 2 : l'état des éléments porteurs est bon ;
- Classe 3 : l'état des éléments porteurs est moyen ;
- Classe 4 : l'état des éléments porteurs est mauvais ;
- Classe 5 : l'état des éléments porteurs est très mauvais.

2.2.1.5 Éléments de contreventement

Le rôle du contreventement horizontal est de transmettre les actions latérales sollicitant les constructions sur les éléments verticaux de contreventement, qui les transfèrent ensuite aux fondations. Par conséquent, pour jouer ce rôle, les planchers doivent être solidarités à la structure sous-jacente. Le contreventement horizontal doit être prévu à tous les niveaux du bâtiment, y compris au niveau des toitures.

Ce paramètre regroupe cinq types d'éléments à savoir :

- Murs en maçonnerie ;
- Voile en béton ;
- Portique en béton armé ;
- Portiques métalliques ;
- Autres.

La classification de ce paramètre est la suivante :

- Classe 1 : l'état des éléments de contreventement est très bon ;
- Classe 2 : l'état des éléments contreventement est bon ;
- Classe 3 : l'état des éléments contreventement est moyen ;
- Classe 4 : l'état des éléments contreventement est mauvais ;
- Classe 5 : l'état des éléments contreventement est très mauvais

2.2.1.6 Planchers-toiture

La toiture n'est pas un élément du bâtiment qui participe directement à sa résistance, mais son type de construction peut avoir un effet favorable ou défavorable. Le matériau constituant les planchers (éléments horizontaux) est également déterminé. Le type de matériau utilisé pour les éléments horizontaux influence le comportement dynamique du bâtiment.

Ce paramètre regroupe trois types de planchers :

- Béton armé ;
- Solives métalliques ;
- Solives en bois

La classification de ce paramètre et comme suite :

- Classe 1 : l'état du plancher est très bon ;
- Classe 2 : l'état du plancher est bon ;
- Classe 3 : l'état du plancher est moyen ;
- Classe 4 : l'état du plancher est mauvais ;
- Classe 5 : l'état du plancher est très mauvais.

2.2.1.7 Élément non structuraux (secondaires)

Le type de matériau utilisé pour les éléments secondaire influence le comportement dynamique du bâtiment. Le type de matériau et les éléments secondaires considérés dans ce paramètre sont :

- Escaliers (béton, métal ou bois) ;
- Remplissages extérieurs (maçonnerie, béton, bardage ou autres) ;
- Éléments extérieurs (balcons, garde corps, auvents, acrotères, cheminées ou autres) ;
- Autre éléments intérieurs (plafond, cloisons, éléments vitré ou acrotères)

La classification de ce paramètre et comme suit :

- Classe 1 : l'état des éléments secondaires est très bon ;
- Classe 2 : l'état des éléments secondaires est bon ;

- Classe 3 : l'état des éléments secondaires est moyen ;
- Classe 4 : l'état des éléments secondaires est mauvais ;
- Classe 5 : l'état des éléments secondaires est très mauvais.

2.2.1.8 Influence des constructions adjacentes

La position du bâtiment par rapport aux autres revêt également une certaine importance. En effet, si deux bâtiments accolés l'un à l'autre n'ont pas la même hauteur d'étage et oscillent à des fréquences différentes, des problèmes de martèlement peuvent apparaître et causer des dégâts importants.

Il est également important de relever la position relative des bâtiments lorsque ceux-ci sont accolés. En effet, les bâtiments situés dans un angle ou en bout de bloc sont plus vulnérables, car leurs déplacements sont moins entravés.

Ce paramètre regroupe quatre types de position sur la structure à savoir :

- La construction menace une autre construction ;
- La construction est menacée par une autre construction ;
- La construction peut être un soutien pour une autre construction ;
- La construction peut être un soutenue par une autre construction.

Pour ce paramètre la classification est définie comme suit :

- Classe 1 : dans cette classe on trouve les constructions qui respectent tous les critères cité dans ce paramètre ;
- Classe 2 : dans cette classe on trouve les constructions qui ne respectent pas les critères cité dans ce paramètre.

2.2.1.9 Symétrie en plan

D'après le RPA2003 [16], le bâtiment idéal, d'un point de vue sismique serait de forme symétrique dans lequel aucun saut de rigidité n'est présent et où les éléments internes de rigidité (cage d'escalier, cage d'ascenseur) sont disposés de manière symétrique. Donc il est important de déterminer la régularité en plan et en élévation de différentes constructions.

Ce paramètre regroupe deux sens de directions qui sont :

- Sens transversal ;
- Sens longitudinal.

La classification de ce paramètre est donnée ci-dessous :

- Classe 1 : les constructions en bonne symétrie ;
- Classe 3 : les constructions d'une symétrie en plan moyenne ;
- Classe 5 : les constructions en mauvaise symétrie.

2.2.1.10 Régularité en élévation

Les avantages des formes symétriques et les problèmes introduits par les configurations complexes des bâtiments se retrouvent aussi en élévation : concentrations de contraintes aux angles rentrants dues aux oscillations différentielles entre parties de volume ou hauteurs différentes dans le bâtiment.

La classification de ce paramètre est comme suit :

- Classe 1 : les constructions en bonne régularité ;
- Classe 3 : les constructions en forme faiblement irrégulière
- Classe 5 : les constructions en forme irrégulière

2.2.2 Classification des paramètres choisis

Pour chaque paramètre, nous avons attribué une valeur comprise entre 1 et 5. La moins vulnérable (1) traduit la conformité de ce paramètre vis-à-vis de l'intégrité de la structure, la plus vulnérable (5) traduit la situation la plus défavorable tandis que les classes 2, 3 et 4 représentent des situations intermédiaires. Le tableau 2.2 présente les différentes classes pour chaque paramètre.

Tableau 2.2 : Classe de vulnérabilité des différents critères structuraux.

N°	Paramètres	Classes				
1	Problème de sol autour de la construction	(Non) 1			(Oui) 5	
2	Fondations	(Non) 1			(Oui) 5	
3	Infrastructure	1	2	3	4	5
4	Éléments porteurs (charges verticales)	1	2	3	4	5
5	Éléments de contreventement	1	2	3	4	5
6	Planchers-toiture	1	2	3	4	5
7	Élément non structuraux (secondaires)	1	2	3	4	5
8	Influence des constructions adjacentes	(Non) 1			(Oui) 5	
9	Symétrie en plan	(Bon) 1	(Moyen) 3		(Mauvais) 5	
10	Régularité en élévation	(Bon) 1	(Moyen) 3		(Mauvais) 5	

2.2.3 Classification de la structure

L'intérêt de cette approche est de pouvoir classer une structure selon sa résistance au séisme.

En se basant sur l'échelle européenne EMS98 [4], sur les fiches d'évaluation des dommages pour les constructions en béton armé et sur la méthode de l'indice de vulnérabilité en Algérie par Bensaïbi [13] [14], nous proposons la classification suivante :

classe	1	2	3	4	5
Couleur à utilisé					

Figure 2.1 : Classifications des constructions selon les fiches d'évaluation des dommages.

- Classe 1 : une très bonne résistance au séisme ;
- Classe 2 : une bonne résistance au séisme ;
- Classe 3 : une moyenne résistance au séisme ;
- Classe 4 : une mauvaise résistance au séisme ;
- Classe 5 : une très mauvaise résistance au séisme

2.3 Conclusion

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti existant sont confrontées à évaluer la vulnérabilité la plus juste pour un coût le plus faible possible afin de l'appliquer à un grand nombre de bâtiments. Elles sont généralement développées sur la base d'observations post-sismiques des pays à forte sismicité.

Des similitudes apparaissent entre les méthodes : (i) elles définissent différents niveaux d'analyse traduisant la qualité de l'estimation ; (ii) elles utilisent une échelle de dommage et une classification des constructions suivant une typologie prédéfinie ; (iii) elles se basent sur la recherche visuelle d'indicateurs structuraux qui modulent la vulnérabilité.

Dans ce chapitre nous nous sommes basés sur la méthode GNDT [2], sur l'EMS98 [4] et sur la méthode de l'indice de vulnérabilité en Algérie par Bensaïbi [13] [14], pour établir la liste des paramètres qui seront retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions en béton armé, à savoir : Problème de sol autour de la construction, les fondations, l'infrastructure, les éléments porteurs (charges verticales), les éléments de contreventement, les planchers-toiture, les élément non structuraux (secondaires), l'influence des constructions adjacentes, la symétrie en plan de la construction et enfin sa régularité en plan.

L'approche proposée consiste à estimer la vulnérabilité des constructions en béton armé en Algérie à partir des fiches d'évaluations des dommages des constructions en béton armé des différentes régions en Algérie par un système intelligent basé sur les réseaux de neurones, pour déterminer le degré d'endommagement des constructions. Cette approche sera détaillée au chapitre 3.

CHAPITRE 3

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA) ET LES RÉSEAUX DE NEURONES (RNs)

3.1 Introduction

L'objectif des premiers chercheurs en intelligence artificielle (IA) était de concevoir des machines intelligentes, capables d'imiter l'homme dans ses tâches intellectuelles les plus complexes. Les domaines pour lesquels l'IA essaye de trouver des solutions peuvent être le diagnostic, le traitement du langage naturel, la représentation et traitement des connaissances, les machines apprenantes, la reconnaissance de forme, la reconnaissance de la parole, la génération de programmes, etc.

Les modèles informatiques présentés dans ce chapitre utilisent une technique d'intelligence artificielle pour traiter l'information connue sous l'appellation de réseaux de neurones. Elle fait partie d'une branche de l'informatique appliquée.

3.2 L'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (terme créé par John McCarthy) [17], souvent abrégée avec le sigle IA, est définie par l'un de ses créateurs, Marvin Lee Minsky [17].

L'IA est une branche de l'informatique dont le but est de réaliser des systèmes intégrant un grand nombre de connaissances et de traitements. Dans tous les secteurs d'activités les techniques de l'IA tendent à élargir le champ d'action des ordinateurs en leur donnant la possibilité de voir, entendre, raisonner, parler et agir.

Searle (1932) [18], philosophe, utilise l'exemple de la « chambre chinoise », dont le principe est le suivant : vous êtes emprisonné en Chine et ne comprenez pas le chinois. Le

prisonnier voisin essaye de communiquer par papier sous la porte en chinois. Vous possédez un livre qui fait correspondre à un symbole chinois un autre symbole de la même langue. Vous utilisez ce livre pour communiquer. Si le chinois croit que vous parlez chinois alors vous êtes intelligent. Pourtant vous ne comprenez rien. L'ordinateur ne comprend pas ce qu'il fait il n'a donc pas d'intelligence.

Depuis quelques années, les systèmes d'intelligence Artificielle (IA) font leur apparition dans le monde informatique. D'abord limitée aux problèmes tirés de la théorie des jeux ou aux problèmes de traitement de la langue naturelle.

En fait l'intelligence artificielle (IA) est définie plus facilement par les outils qu'elle met en œuvre. Parmi ces outils, nous pouvons citer :

- La logique floue (Fuzzy logic)
- Les algorithmes génétiques (Genetic Algorithms)
- Les systèmes experts (Expert Systems)
- Les réseaux de neurones (Neural network)

Le développement qui se fait à travers les méthodes par lesquelles l'homme essaye de copier la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propres. Bien que ces approches paraissent "naturelles", et si elles se sont imposées dans des domaines allant du traitement de l'image à la gestion financière, elles trouvent aujourd'hui d'autres applications industrielles d'optimisation, de classification, de détection de défauts ou de prise de décision, etc. Parmi les différentes techniques de l'intelligence artificielle, on cite :

- Logique floue

La logique floue (*fuzzy logic*, en anglais) est une technique utilisée en intelligence artificielle. Elle a été formalisée par Lotfi Zadeh en 1965 [19] et utilisée dans des domaines aussi variés que l'automatisme (freins ABS), la robotique (reconnaissance de formes), la gestion de la circulation routière (feux rouges), le contrôle aérien, l'environnement (météorologie, climatologie, sismologie), la médecine (aide au diagnostic), l'assurance (sélection et prévention des risques) et bien d'autres. En fait, le simple fait de noter, déjà sous Jules Ferry, un élève dans différentes disciplines et de lui calculer un rang par application de coefficients à ses notes était déjà faire de la logique floue sans le savoir.

Elle s'appuie sur la théorie mathématique des ensembles flous. Cette théorie, introduite par Zadeh [19], est une extension de la théorie des ensembles classiques pour la prise en compte d'ensembles définis de façon imprécise. C'est une théorie formelle et mathématique dans le sens où Zadeh [19], en partant du concept de fonction d'appartenance pour modéliser la définition d'un sous-ensemble d'un univers donné, a élaboré un modèle complet de propriétés et de définitions formelles. Il a aussi montré que cette théorie des sous-ensembles flous se réduit effectivement à la théorie des sous-ensembles classiques dans le cas où les fonctions d'appartenance considérées prennent des valeurs binaires ($\{0,1\}$).

- Algorithmes génétiques (AG)

Les algorithmes génétiques, initiés dans les années 1970 par John Holland [20], sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection. Les algorithmes génétiques peuvent être particulièrement utiles dans les domaines suivants :

- Optimisation: optimisation de fonctions, planification, etc.
- Apprentissage: classification, prédiction, robotique, etc.
- Programmation automatique,
- Étude du vivant, du monde réel : marchés économiques, comportements sociaux, systèmes immunitaires, etc.

- Les systèmes experts (SE)

La notion de systèmes experts est une notion assez ancienne qui a apparue dans les années 70 avec l'apparition du système expert célèbre MYCIN [21] dont le but était d'aider les médecins à effectuer le diagnostic et le soin des maladies infectieuses du sang.

Aujourd'hui, les systèmes experts constituent une technologie bien définie faisant partie des systèmes à base de connaissances. Les systèmes experts ont comme finalité la modélisation de la connaissance et de raisonnement d'un expert (ou d'un ensemble d'experts) dans un domaine donné.

Pour cela, trois acteurs principaux doivent contribuer à l'élaboration d'un système expert à savoir [21] : l'utilisateur final, l'expert du domaine et l'ingénieur de connaissances. L'interaction entre ces trois acteurs amènera à l'élaboration d'une première version de systèmes experts contenant une base de connaissances, une base de faits et un moteur d'inférence effectuant une forme définie de raisonnement.

Les experts humains sont capables d'effectuer un niveau élevé de raisonnement à cause de leur grande expérience et connaissance sur leurs domaines d'expertise. Un système expert utilise la connaissance correspondante à un domaine spécifique afin de fournir une performance comparable à l'expert humain. En général, les concepteurs de systèmes experts effectuent l'acquisition de connaissance grâce à une ou plusieurs interviews avec l'expert ou les experts du domaine. Les humains qui enrichissent le système avec leurs connaissances ne fournissent pas seulement leur connaissance théorique ou *académique* mais aussi des heuristiques qu'ils ont acquises grâce à l'utilisation de leurs connaissances.

Contrairement à la modélisation cognitive, les systèmes experts n'ont pas comme finalité de s'inspirer des théories du fonctionnement du cerveau humain mais ce sont des programmes qui utilisent des stratégies heuristiques pour la résolution des problèmes spécifiques.

3.3 Les réseaux de neurones (RNs) et leurs applications

3.3.1 Historique

Une première vague d'intérêt aux réseaux de neurones a vu le jour après l'introduction par Mc Culloch et Pitts [22] en 1943 de la notion des neurones simplifiés (perceptron) [23]. Ces neurones ont été présentés comme un modèle du neurone biologique et comme un élément de base pour des circuits (réseaux) capables de réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes. En 1949 Hebb [24], physiologiste américain, propose une loi de modification des propriétés des connexions entre les neurones, qui explique en partie le conditionnement pavlovien chez l'animal.

Les premiers succès de cette méthode fut présentés par Rosenblatt [25] en 1957 qui a construit le premier neuro-ordinateur basé sur le modèle du Perceptron [23] et l'a appliqué au domaine de la reconnaissance des formes. En 1960, Widrow [26] a développé le modèle Adaline [1] qui a amélioré la loi d'apprentissage.

En 1982, Hopfield [24] a renouvelé l'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels. Au travers d'un article court, clair et bien écrit, il présente une théorie du fonctionnement et des possibilités des réseaux de neurones. Hopfield [24] fixe préalablement le comportement à atteindre pour son modèle et construit à partir de là, la structure et la loi d'apprentissage correspondant au résultat escompté. Ce modèle est aujourd'hui encore très utilisé pour des problèmes d'optimisation. Notons qu'à cette date, l'IA est l'objet d'une certaine désillusion, elle n'a pas répondu à toutes les attentes et s'est même heurtée à de sérieuses limitations.

En 1985 la rétropropagation de gradient apparaît. C'est un algorithme d'apprentissage adapté aux réseaux de neurones multicouches. Dès cette découverte, on a la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables. De nos jours, les réseaux multicouches et la rétropropagation de gradient reste le modèle le plus étudié et le plus productif au niveau des applications.

Et depuis les réseaux neuronaux ont connu un grand essor vu les applications potentielles et la disponibilité de grands calculateurs. En fait les réseaux de neurones sont utilisés dans de nombreux domaines à cause de leurs propriétés et en particulier, leur capacité d'apprentissage et de généralisation.

Néanmoins les réseaux de neurones artificiels ont besoin de cas réels servant d'exemples pour leur apprentissage. Ces cas doivent être d'autant plus nombreux que le problème est complexe et que sa topologie est peu structurée. Sur un plan pratique, cela n'est pas toujours facile car les exemples peuvent être soit en quantité absolument limitée ou trop onéreux à collecter en nombre suffisants.

3.3.2 Neurone biologique:

Un réseau de neurones reprend pour schéma le fonctionnement des cellules nerveuses du cerveau [27]. Ces cellules se nomment des neurones et sont constituées de quatre éléments distincts. La partie centrale contenant le noyau, les dendrites, un(e) axone, des synapses. Les synapses servent à l'interconnexion entre les différents neurones. Les dendrites reçoivent les informations d'autres neurones tandis que l'axone (qui est nécessairement seul) envoie l'information après traitement par la cellule nerveuse à d'autres neurones. Sans

entrer dans le détail, il faut aussi savoir qu'une synapse (qui est le point de passage obligé de l'influx nerveux) peut être inhibitrice ou excitatrice. C'est à dire qu'elle peut amoindrir ou non un message de l'influx nerveux. C'est l'interaction entre toutes les cellules et leur façon d'être interconnectées qui permet de traiter une information.

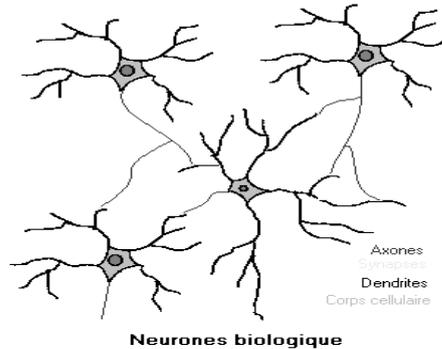


Figure 3.1 : Schéma simplifié d'un neurone

3.3.3 Neurone formel

Des observations de neurone biologique, découle le modèle du neurone formel proposé par Mac Culloch et Pitti en 1943 [22] :

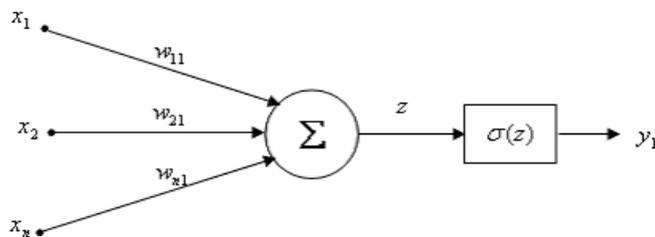


Figure 3.2 : Neurone formel

Les x_i représentent le vecteur d'entrée, et proviennent soit des sorties d'autres neurones, soit de stimuli sensoriels (capteur visuel, sonore, etc.)

Les w_{ij} sont les poids synaptiques du neurone j . Ils correspondent à l'efficacité synaptique dans les neurones biologiques ($w_{ij} > 0$) : synapse excitatrice; $w_{ij} < 0$: synapse inhibitrice). Ces poids pondèrent les entrées et peuvent être modifiés par apprentissage.

Le potentiel somatique $z(t)$ est calculé par la somme de toutes les entrées pondérées:

$$z(t) = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i \quad 3.1$$

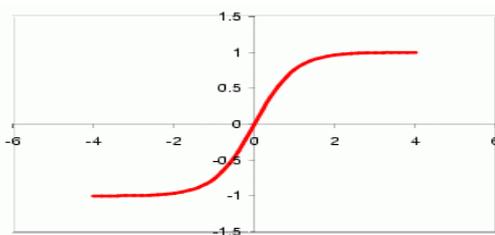
On applique une fonction d'activation sur ce potentiel somatique pour obtenir la valeur de sortie du neurone j (la fonction d'activation calcule la valeur de l'état du neurone). C'est cette valeur qui sera transmise aux neurones avals:

$$f(x) = \sigma(z(t)) \quad 3.2$$

La fonction d'activation σ peut prendre les formes les plus courantes qui sont présentées à la figure 3.3 :

La tangente hyperbolique

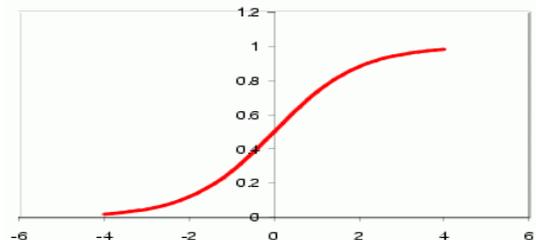
$$f(x) = \text{th}[2/(1 + \exp(-2x)) - 1]$$



Le sigmoïde standard,

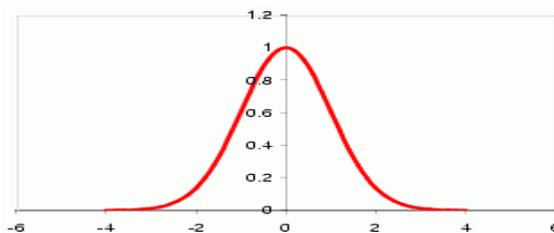
(Fonction logistique)

$$f(x) = 1/(1 + \exp(-dx))$$



La fonction Gaussien

$$f(x) = \exp(-(x^2)/2)$$



Une fonction à seuil

$$f(x) = 0 \text{ si } x < 0 \text{ et } f(x) = 1 \text{ si } x \geq 0$$

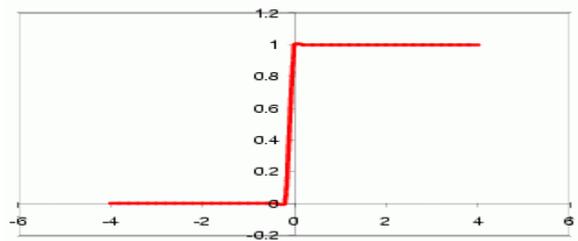


Figure 3.3 : Fonctions d'activations

La fonction d'activation des neurones de la couche d'entrée est une fonction linéaire, pour les neurones des couches cachées et les neurones de la couche de sortie la fonction d'activation est une fonction non linéaire (généralement une sigmoïde), permettant d'introduire au réseau l'aspect non linéaire. Elle doit être continue, différentielle et bornée.

La figure 3.4 montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w abréviation (weight) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une connexion et à chaque connexion est associé un poids.

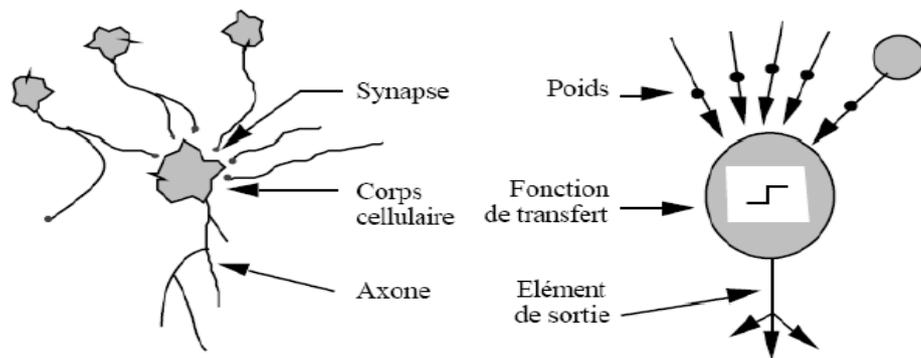


Figure 3.4 : Mise en correspondance neurone biologique /neurone artificiel.

3.3.4 Principe de fonctionnement général

On peut donner quelques définitions selon les auteurs sur le fonctionnement des réseaux de neurones qui sont les suivantes :

- Selon le DARPA [28], un réseau de neurones est un système composé de plusieurs unités de calcul simples fonctionnant en parallèle, dont la fonction est déterminée par la structure du réseau, la solidité des connexions, et l'opération effectuée par les éléments ou nœuds.
- Selon S.Haykin [29], un réseau de neurones est un processeur massivement distribué en parallèle qui a une propension naturelle pour stocker de la connaissance empirique (*experiential knowledge* selon l'auteur) et la rendre disponible à l'usage.
- Il ressemble au cerveau sur deux aspects:
 1. La connaissance est acquise par le réseau au travers d'un processus d'apprentissage.

2. Les connexions entre les neurones, connues sous le nom de poids synaptiques, servent à stocker la connaissance.
 - Selon A.Nigrin [30], un réseau de neurones est un circuit composé d'un nombre très important d'unités de calcul simples basées sur des neurones. Chaque élément opère seulement sur l'information locale. Chaque élément opère de façon asynchrone; il n'y a donc pas d'horloge générale pour le système.
 - Selon J.M.Zurada [31], les systèmes de neurones artificiels, ou réseaux de neurones, sont des systèmes physiques cellulaires qui peuvent acquérir, stocker et utiliser de la connaissance empirique (*experiential knowledge* [31] selon l'auteur).

Comme leur nom l'indique, les réseaux de neurones sont organisés autour d'un ensemble de cellules ou neurones. Le principe de fonctionnement est le suivant : on dispose d'une base de connaissances constituée de couples (entrées, sorties) et on veut utiliser cette base pour entraîner une mémoire informatique à raisonner en prenant comme référence cette base empirique.

3.4 Architecture des réseaux de neurones

Un réseau de neurones résulte de l'arrangement du modèle de base du neurone individuel dans diverses configurations. Plusieurs architectures sont donc envisageables.

On doit cependant réaliser que les algorithmes utilisés pour entraîner les RNs ont une adéquation très forte avec une architecture donnée, c'est-à-dire qu'ils leurs sont intimement liés. Jusqu'à ce jour, plusieurs topologies et algorithmes d'apprentissage ont été imaginés et conçus.

3.4.1 Les réseaux non boucles

Ce sont des réseaux unidirectionnels sans retour arrière (feedforward) [32]. Le signal de sortie est directement obtenu après l'application du signal d'entrée (voir figure 3.5). Ce sont des systèmes statiques, utilisés principalement pour la modélisation statique de

processus. La fonction réalisée par un réseau de neurones non bouclé est une fonction algébrique.

La fonction non linéaire réalisée par un réseau, dépend des valeurs des poids Le temps n'intervient pas comme variable fonctionnelle, le réseau n'a pas de mémoire et ses sorties ne dépendent pas de son passé. Ces réseaux sont utilisés en classification, reconnaissance des formes (caractères, parole, en prédiction, etc.).

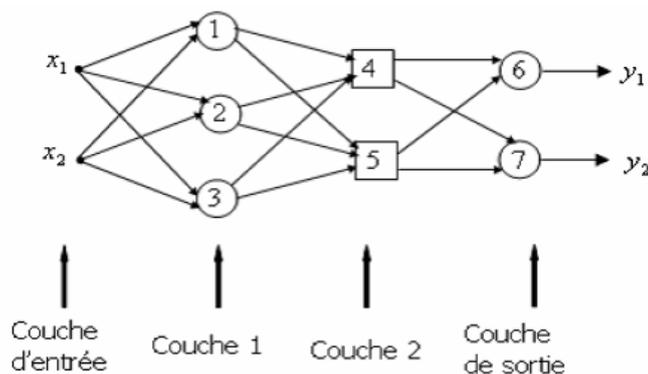


Figure 3.5 : Réseau non bouclé.

3.4.2 Les réseaux boucles

Il s'agit des réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network or recurrent network) [33] (voir figure 3.6). Ce sont des systèmes dynamiques, utilisés comme filtre non linéaire, ainsi pour la modélisation et la commandes de processus. La fonction réalisée par un réseau non boucle est un ensemble d'équations différentielles.

La fonction non linéaire réalisée par un réseau, dépend des valeurs des poids w_{ij} . Pour qu'un réseau effectue une tâche donnée, il faut donc ajuster la valeur de ses poids, l'opération d'ajustement des poids est appelée apprentissage.

Ces réseaux sont utilisés comme mémoire associative (Hopfield [24], réseaux à attracteurs) ou pour des tâches de traitement du signal ou de commande.

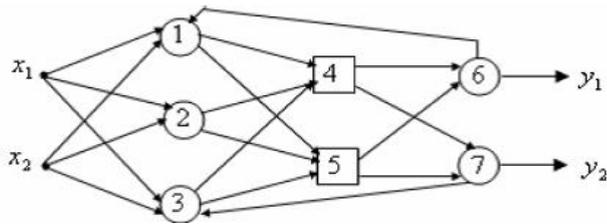


Figure 3.6 : Réseau bouclé.

3.5 L'apprentissage des réseaux de neurones

La mémoire permet de s'adapter à un environnement changeant et d'anticiper ces changements. Elle a deux fonctions distinctes: l'acquisition d'un élément d'information par un processus d'apprentissage, et le rappel de l'information stockée.

Les entrées du réseau de neurones perçoivent des informations sur l'environnement. La mémoire et son organisation sont intimement liées à la structure et aux valeurs des paramètres du réseau que l'apprentissage consiste à modifier. Les sorties du réseau permettent d'agir sur l'environnement ou sur le réseau lui-même par le biais de connexions dites récurrentes.

On peut distinguer trois types d'apprentissage:

- L'apprentissage supervisé.
- L'apprentissage non supervisé (auto organisation).
- L'apprentissage par renforcement.

Pour ces trois types d'apprentissage, il y a également un choix traditionnel entre :

- L'apprentissage (off- line) [32] : toutes les données sont dans une base d'exemples d'apprentissage qui sont traités simultanément.
- L'apprentissage (on-line) [32] : les exemples sont présentés les un après les autres au fur et à mesure de leurs disponibilités.

Ainsi que plusieurs types de structures de réseaux:

- connexions récurrentes.
- couches.

Et plusieurs modes de fonctionnement:

- Statique (qui ne tient pas compte de ses états antérieurs).
- Dynamique (qui dépend de ses états antérieurs).
- Stochastique (dont l'activation est soumise à une loi de probabilité).

Il existe aussi différents types d'entrées-sorties:

- Discret - relation d'ordre (nombres entiers par exemple).
- Continu - relation d'ordre (nombres réels).

L'apprentissage d'un réseau de neurones artificiels est induit par une procédure itérative d'ajustement de ses paramètres internes (poids synaptiques et nombres de neurones). Cette procédure d'ajustement est décrite par un algorithme d'apprentissage. Celui-ci détermine alors le comportement du réseau. Ainsi le comportement d'un même réseau diffère selon l'algorithme d'apprentissage utilisé pour modifier ses paramètres. Aussi, l'apprentissage consiste à appliquer un ensemble d'exemples (entrées-sorties désirées) qui constituent la base d'apprentissage à partir de la différence entre les sortie du réseau et les sortie désirées, les poids d'interconnexions seront ajustés suivant une règle d'apprentissage prédéfinie, de manière que les sortie du réseau soient aussi proches que possible des sortie désirées pour commencer l'apprentissage, les poids d'interconnexions doivent être initialisés arbitrairement. L'apprentissage sera considéré comme accompli lorsque le réseau atteint un niveau de performances défini par l'utilisateur. Ce niveau signifie que le réseau a achevé une précision statistique désirée. Après l'apprentissage, le réseau peut être utilisé pour prédire le nouvel échantillon de sortie, basé seulement sur la connaissance de l'échantillon d'entrée.

Ainsi il existe d'autre type de grandes classes d'apprentissage :

3.5.1 Apprentissage non supervisé

Ce type d'apprentissage est choisi lorsqu'il n'y pas de connaissances à priori des sorties désirés pour des entrées données. En fait, c'est de l'apprentissage par exploration où l'algorithme d'apprentissage ajuste les poids des liens entre neurones de façon à maximiser la qualité de classification des entrées [34].

Pour les réseaux à apprentissage non supervisé (Hop Field [24], Kohonen [35], etc.), on présente une entrée au réseau et on le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise.

3.5.2 Apprentissage par renforcement

Dans ce cas, bien que les sorties idéales ne soient pas connues directement, il y a un moyen quelconque de connaître si les sorties du RNs s'approchent ou s'éloignent du but visé. Ainsi, les poids sont ajustés de façons plus ou moins aléatoire et la modification est conservée si l'impact est positif ou rejetée.

3.5.3 Apprentissage supervise

Cet algorithme d'apprentissage ne peut être utilisé que lorsque les combinaisons d'entrées sorties désirées sont connues. L'apprentissage est alors facilité et par là, beaucoup plus rapide que pour les deux autres algorithmes puisque l'ajustement des poids est fait directement à partir de l'erreur, soit la différence entre la sortie obtenue par le RNs et la sortie désirée.

Une fois le type d'apprentissage choisi selon les connaissances à priori du problème à résoudre, un autre aspect important consiste à déterminer si le réseau de neurones, dans sa phase d'exploitation, sera statique ou dynamique. Dans le premier cas, un préapprentissage sera effectué alors que dans le second, un apprentissage continu sera requis pour permettre au RNs de réagir aux changements de son environnement. Algorithme d'apprentissage ne peut être utilisé que pour les combinaisons [36].

L'apprentissage supervisé consiste à modifier, durant une phase d'entraînement, les valeurs des différents paramètres (poids synaptiques, seuil d'activation...) du neurone (ou du réseau). Ce sont ces valeurs qui définissent le comportement du neurone (ou du réseau), qui définissent quelle est la valeur de sortie du neurone (ou du réseau) en fonction des valeurs d'entrée lors de la phase d'exploitation [37].

Lors de la phase d'entraînement, on extrait un sous-ensemble de vecteurs d'entrée de la base d'apprentissage appelé vecteurs d'apprentissage, et un sous ensemble complémentaire de vecteurs de test. On présente alors au neurone (ou réseau) un vecteur d'apprentissage, on calcule sa sortie et on modifie ses poids synaptiques en suivant une règle d'apprentissage. Lorsqu'on a présenté tous les vecteurs d'apprentissage, on présente les vecteurs de test qui

n'ont pas servi à l'apprentissage, et on calcule le taux d'erreurs que fait le réseau, c'est-à-dire sa capacité à généraliser. Tant qu'on est en dessous d'un certain seuil, on recommence la phase d'entraînement, avec un nouveau sous-ensemble d'apprentissage et un nouveau sous-ensemble de test. Si les résultats sont satisfaisants, on passe à la phase d'exploitation. La phase d'exploitation est la mise en application directe du réseau. On ne modifie plus ses poids.

3.5.4 Préapprentissage

Sous cette condition, la phase d'apprentissage et d'exploitation du réseau de neurones est bien distincte. Une fois l'apprentissage terminé, la structure et les poids entre les neurones sont fixés. Lorsque la tâche à effectuer par le RNs ne change pas significativement avec le temps, un RNs statique peut être très efficace et beaucoup plus simple d'implémentation. Par ailleurs, il n'est alors pas aussi important de se soucier de la simplicité de la fonction d'apprentissage et de la rapidité de convergence du RNs.

3.5.5 Apprentissage continu

Un apprentissage continu est requis lorsque les combinaisons d'entrées-sorties idéales risquent de changer avec le temps ou selon diverses conditions externes. Le gain de flexibilité inhérent à la capacité d'adaptation du RNs s'obtient au détriment d'une implémentation plus complexe du système puisque l'algorithme d'apprentissage doit alors être intégré à la structure de calcul du RNs [34].

Ainsi, pour un système en temps réel, la rapidité d'adaptation ou de convergence de la fonction d'apprentissage devient alors un facteur très important. Par ailleurs, la complexité d'implémentation de la fonction d'apprentissage devient également un élément à considérer dans le choix de l'algorithme d'apprentissage, parfois au détriment de la performance.

L'ajustement du poids des liens entre les neurones peut s'effectuer selon diverses équations mathématiques, dont la plus populaire est sans aucun doute la loi de Hebb. Les autres équations sont souvent des dérivées de cette dernière. Par ailleurs, le choix de l'équation d'adaptation des poids dépend en grande partie de la topologie du réseau de neurones utilisé. Notons qu'il est aussi possible de faire évoluer l'architecture du réseau, soit le

nombre de neurones et les interconnexions, mais avec d'autres types d'algorithmes d'apprentissage.

3.5.6 La règle HEBB

Cette règle très simple émet l'hypothèse [38] que lorsqu'un neurone A est excité par un neurone B de façon répétitive ou persistante, l'efficacité (ou le poids) de l'axone reliant ces deux neurones devrait alors être augmentée.

Lorsque deux neurones proches sont actifs simultanément, le poids synaptique les reliant est augmenté de manière à faciliter une telle co-activité ultérieure. Dans les autres cas, le poids reste inchangé.

Ce qui se traduit par:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \cdot x_i(t) \cdot y_j(t) \quad 3.3$$

où $\alpha(t)$ est le coefficient d'apprentissage, w_{ij} le poids synaptique reliant l'entrée x_i au neurone j , et y_j la sortie du neurone j .

Le problème de cette règle est qu'on ne peut mémoriser qu'un nombre limité d'associations vecteur d'entrée valeur de sortie.

3.5.7 Loi de HOP FIELD

Cette loi [24] se base sur la même hypothèse que la loi de Hebb [38], mais ajoute une variable supplémentaire pour contrôler le taux de variation du poids entre les neurones avec une constante d'apprentissage qui assure à la fois la vitesse de convergence et la stabilité du RNs.

3.5.8 Loi de DELTA

Cette loi [26] est aussi une version modifiée de la loi de Hebb [38]. Les poids des liens entre les neurones sont continuellement modifiés de façon à réduire la différence (le delta) entre la sortie désirée et la valeur calculée de la sortie du neurone. Les poids sont modifiés de façon à minimiser l'erreur quadratique à la sortie du RNs. L'erreur est alors propagée des neurones de sortie vers les neurones des couches inférieures, dans la règle de delta

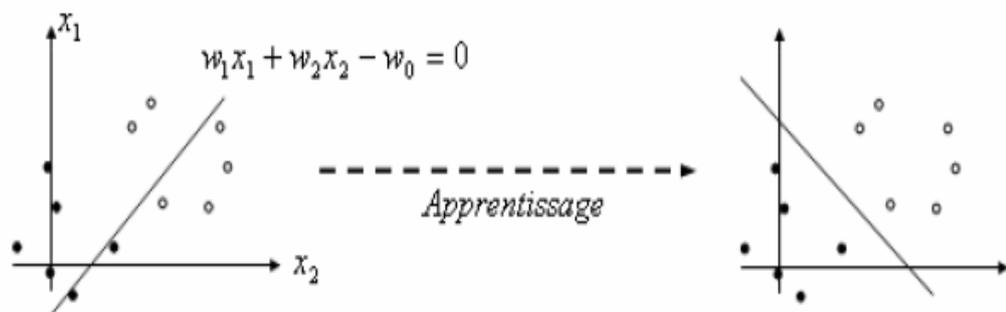
appelée aussi règle de widrow-hoff [32], l'apprentissage est réalisé par itération. Les poids à la phase initiale sont générés aléatoirement. Ensuite la valeur de w_{ij} au temps $(t+1)$ s'obtient par

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_j(t) \cdot x_j \quad 3.4$$

où $\delta_j(t)$ est l'erreur faite par le neurone.

3.5.9 Le perceptron

Le perceptron [23] utilise la fonction d'activation à seuil, qui permet de classer les vecteurs d'entrée dans un hyperplan. La règle d'adaptation permet de modifier la position de l'hyperplan séparateur dont l'équation dans l'espace d'entrée est définie par les poids du neurone, afin de réduire l'erreur $(d(t) - y(t))$. Ainsi, à chaque présentation d'un couple (x, y) mal classé (c'est-à-dire dont la sortie proposée $y(t)$ par le neurone ne correspond pas à la sortie désirée $d(t)$) il faut modifier le vecteur poids de manière à ramener le point mal classé du bon côté de l'hyperplan (voir figure 3.7.). Si le point est bien classé, on ne fait rien.



Droite séparatrice dont l'équation dans l'espace d'entrée est définie par les poids synaptiques du perceptron

solution qui sépare correctement l'espace d'entrée en deux classes

Figure 3.7 : Principe d'apprentissage

Règle du Perceptron :

$$w_i(t + 1) = w_i(t) + \alpha(t)(d(t) - y(t)) \cdot x_i \quad 3.5$$

où

$$y(t) = \text{sign}(z(t)) \Leftrightarrow \begin{cases} p(t) > 0 \Rightarrow y(t) = 1 \\ p(t) < 0 \Rightarrow y(t) = -1 \end{cases} \quad 3.6$$

et

$$d(t) \in [-1,1]$$

3.5.10 L'ADALINE

Soit un neurone dont la fonction de sortie est l'identité:

$$y(t) = \sigma(z(t)) = z(t) \quad 3.7$$

La sortie de neurone dépend linéairement des entrées d'où son nom .Il s'agit de résoudre un système d'équations linéaires (car σ est l'identité pour l'ADALINE) [39].

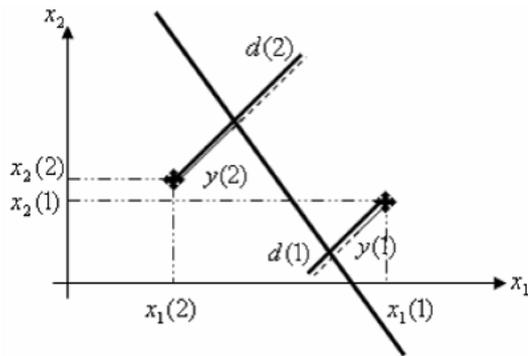
Exemple pour n vecteurs d'apprentissage à deux dimensions présenté lors de la phase d'entraînement:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma. (x_1(1)w_1 + x_2(1)w_2 - w_0) = y(1) \\ \sigma. (x_1(2)w_1 + x_2(2)w_2 - w_0) = y(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \sigma. (x_1(n)w_1 + x_2(n)w_2 - w_0) = y(n) \end{array} \right. \quad 3.8$$

Faire l'apprentissage du neurone consiste donc à trouver les poids w_i qui sont solutions de ce système .On constate que ce système n'a en générale pas de solution, si le nombre d'exemples présentés (ici n) est supérieur à la dimension de l'espace d'entrée plus un (pour les seuils) (ici $2+1 = 3$) donc au nombre d'inconnues (w_0, w_1 et w_2).

Comme le système n'a souvent pas de solution, on va essayer de trouver une droite telle que la somme des écarts entre la distance $d(k)$ que l'on désire associer au vecteur d'entrée $x(k)$ et la distance réelle $y(k)$ de ce vecteur à la droite, soit minimale voir figure 3.8.

$$w_1x_1 + w_2x_2 + w_0 = 0 \quad 3.9$$



- Distance désirée
- Distance réelle
- - - Erreur $(d(k)-y(k))$ dont on veut que la somme pour tous les couples $(X(k), d(k))$ soit minimale

Figure 3.8 : Présentation des écarts entre $d(k)$ et $y(k)$

On va chercher par une méthode itérative (méthode du gradient stochastique) à minimiser un critère d'erreur de notre choix. Le critère des moindres carrés [36] est très souvent utilisé:

$$\varepsilon(\vec{w}, k) = \frac{1}{2} (d(k) - y(k))^2 \quad 3.10$$

Où $d(k)$ est la sortie désirée et $y(k)$ la sortie réellement fournie par le neurone pour chaque vecteur d'apprentissage, et w est le vecteur poids.

L'information stockée par un neurone au niveau de ses poids est apprise des données. Les poids du réseau sont modifiés pour que la sortie qu'il propose soit le plus proche possible de la sortie désirée que les données impose.

L'apprentissage est en fait une phase d'optimisation itérative d'une fonction de coût dont le minimum est la solution recherchée. La configuration des poids telle que la sortie obtenue soit le plus proche possible de la sortie désirée au sens des moindres carrés.

Pour minimiser une fonction continue, il existe d'autres techniques telles que la descente de gradient. Cette technique permet cependant d'illustrer de manière simple les principes de l'apprentissage valables pour un neurone seul, mais aussi pour un ensemble de neurones.

3.6 Le Perceptron multicouches (MLP)

Ce sont les réseaux de neurones les plus connus. Un perceptron est un réseau de neurones artificiel du type *feedforward*, c'est à dire à propagation directe, et on peut l'appeler aussi réseau de neurones à rétropropagation RPG.

3.6.1 Structure du réseau RPG

Une seule couche de neurones ne pouvant réaliser que des séparations linéaires, l'idée vient alors de rajouter des couches dites cachées pour réaliser un réseau de neurones multicouche. Dans une couche, les neurones ne sont pas connectés entre eux. Le MLP (Multi Layer Perceptron) est un exemple d'un tel réseau. On peut alors voir la sortie d'un réseau comme une somme pondérée des sorties des neurones de la couche précédente. Si au lieu de neurones linéaires, on utilise des neurones non linéaires (fonction de sortie de type sigmoïde), la sortie d'un réseau est une somme pondérée de sigmoïdes, et donc si l'on place les sigmoïdes des neurones des couches internes judicieusement (en réglant leurs poids), on peut théoriquement approcher n'importe quelle fonction, pourvu que l'on ait une couche cachée et suffisamment de neurones dans cette couche.

Le problème se pose alors de régler correctement les poids d'un tel réseau, donc de réaliser son apprentissage.

3.6.2 Algorithme de la rétropropagation du gradient d'erreur (BACKPROPAGTION)

Pour réaliser l'apprentissage d'un réseau multicouche, on utilise la règle d'apprentissage du delta généralisé pour chaque neurone j [40]:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_j(t) \cdot x_i \quad 3.11$$

où $\delta_j(t)$ est l'erreur faite par le neurone j .

Exemple avec un réseau à deux entrées, trois neurones dans une couche cachée, et deux neurones dans la couche de sortie (voir figure 3.9) :

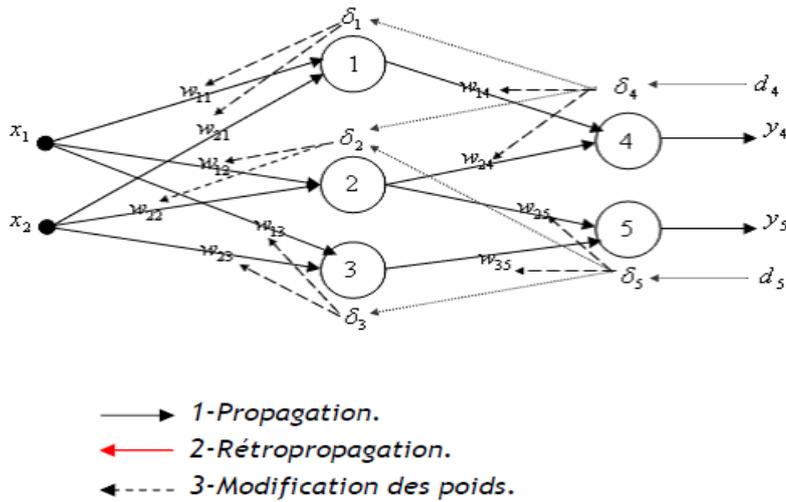


Figure 3.9 : Algorithme de Rétro propagation

Pour pouvoir modifier les poids synaptiques reliant la couche d'entrée à la couche cachée ($w_{11}w_{12}w_{13}$ et $w_{21}w_{22}w_{23}$), il faut connaître les sorties désirées d_1, d_2 et d_3 qui permettent d'appliquer la règle du delta généralisé, connaître les erreurs: δ_1, δ_2 et δ_3 que font les neurones 1, 2 et 3.

L'idée consiste alors à propager les erreurs δ_4 et δ_5 vers les neurones 1, 2 et 3, à travers des poids $w_{14}w_{24}w_{25}$ et w_{35} . Le nom de rétropropagation du gradient d'erreur de l'algorithme est proposé par Rumelhart [32].

Les étapes de calcul de l'algorithme de rétropropagation du gradient d'erreur est comme suite :

1 - Calculer par propagation les valeurs de sortie de tous les neurones de la couche d'entrée vers la couche de sortie:

$$y_i(t) = \sigma \left(\sum_{i=0}^n w_{ij}(t) y_i(t) \right) \quad 3.12$$

Où $x_0 = -1$ et w_{0j} est le seuil du neurone j , et y_0 correspond à l'entrée x_i du réseau connectée au neurone j ou bien à la sortie du neurone i de la couche précédente.

2 - Calculer par rétro propagation l'erreur des neurones de la couche de sortie vers la couche d'entrée :

$$\delta_j(t) = (d_j(t) - y_j(t)) \cdot \sigma' \left(\sum_{i=0}^n w_{ij}(t) y_i(t) \right) \quad 3.13$$

Pour tous les neurones j de la couche de sortie reliés à n neurones i de la couche cachée précédente, et

$$\delta_j(t) = \sum_{k=1}^n w_{kj}(t) \cdot \delta_k(t) \cdot \sigma' \left(\sum_{i=0}^n w_{ij}(t) y_i(t) \right) \quad 3.14$$

Pour tous les neurones j d'une couche cachée reliés à m neurones k de la couche suivante, et n neurones i de la couche précédente où y_i correspond à l'entrée x_i du réseau connectée au neurone j ou bien à la sortie du neurone i de la couche précédente.

3 - Modifier tous les poids du réseau en appliquant la règle du delta Généralisé :

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \cdot \delta_j(t) \cdot y_i(t) \quad 3.15$$

Où y_i correspond à l'entrée x_i du réseau connectée au neurone j ou bien à la sortie du neurone i de la couche précédente.

Bien que certains algorithmes soient réellement complexes, l'apprentissage supervisé d'un réseau à propagation avant avec un des algorithmes les plus populaire, soit « Back propagation », est plutôt simple. Voici les différentes étapes à suivre lors de l'apprentissage d'un réseau de neurones à propagation avant avec l'algorithme « Back propagation » :

Étape 1 : Initialiser les poids des liens entre les neurones. Souvent une valeur entre 0 et 1, déterminée aléatoirement, est assignée à chacun des poids.

Étape 2 : Application d'un vecteur entrées-sorties à apprendre.

Étape 3 : Calcul des sorties du RNs à partir des entrées qui lui sont appliquées et calcul de l'erreur entre ces sorties et les sorties idéales à apprendre.

Étape 4 : Correction des poids des liens entre les neurones de la couche de sortie et de la première couche cachée selon l'erreur présente en sortie.

Étape 5 : Propagation de l'erreur sur la couche précédente et correction des poids des liens entre les neurones de la couche cachée et ceux en entrées.

Étape 6: Boucler à l'étape 2 avec un nouveau vecteur d'entrées-sorties tant que les performances du RNs (erreur sur les sorties) ne sont pas satisfaisantes.

L'algorithme de rétro propagation du gradient consiste à effectuer une descente de gradient sur la fonction de coût déjà utilisée pour le neurone seul :

$$\varepsilon(\vec{w}, k) = \frac{1}{2} (d(k) - y(k))^2 \quad 3.16$$

Où y est la sortie du réseau (donc une somme pondérée de sigmoïdes) et non la sortie d'un neurone seul.

En dérivant cette expression par rapport à chaque poids w , on retrouve la règle d'apprentissage donnée dans l'algorithme.

3.7 Les étapes de la conception d'un réseau

La première chose à faire n'est pas de choisir le type de réseau mais de bien choisir son/ses échantillons de données d'apprentissage, tests et validation. Les quatre grandes étapes qui doivent guider la création d'un réseau de neurones sont les suivant :

3.7.1 Choix des échantillons

Le processus d'élaboration d'un réseau de neurones commence toujours par le choix des échantillons. Cette étape est cruciale et va aider le concepteur à déterminer le type de réseau le plus approprié pour résoudre son problème. La façon dont se présente l'échantillon conditionne : le type de réseau, le nombre de cellules d'entrée, le nombre de cellules de sortie et la façon dont il faudra mener l'apprentissage, les tests et la validation.

3.7.2 Élaboration de la structure du réseau

La structure du réseau dépend étroitement du type des échantillons. Il faut d'abord choisir le type de réseau : un perceptron standard, un réseau de Hopfield, un réseau de Kohonen, etc. Dans le cas du perceptron par exemple, il faut aussi choisir le nombre de neurones dans la couche cachée. Plusieurs méthodes existent et on peut par exemple prendre une

moyenne du nombre de neurones d'entrée et de sortie, mais rien ne vaut de tester toutes les possibilités et de choisir celle qui offre les meilleurs résultats.

3.7.3 Apprentissage

L'apprentissage est l'avant dernière phase d'élaboration d'un réseau de neurones. Elle consiste tout d'abord à calculer les pondérations optimales des différentes liaisons, en utilisant un échantillon. La méthode la plus utilisée est la backpropagation : on entre des valeurs des cellules d'entrée et en fonction de l'erreur obtenue en sortie (le delta), on corrige les poids accordés aux pondérations. C'est un cycle qui est répété jusqu'à ce que la courbe d'erreurs du réseau ne soit croissante (il faut bien prendre garde de ne pas sur-entraîner un réseau de neurones qui deviendra alors moins performant). Il existe d'autres méthodes d'apprentissage telles que le *quickprop* par exemple, mais la plus utilisée reste encore la rétropropagation.

3.7.4 Validation

Une fois le réseau calculé, il faut procéder à des tests pour vérifier que le réseau réagit bien comme on le souhaite : c'est la validation. Il y a plusieurs méthodes pour faire la comparaison. On mentionne la régression multiple cross validation [41] etc. La méthode la plus simple étant de garder une partie de l'échantillon réservé à l'apprentissage, pour la validation et faire ainsi une validation hors-échantillon.

3.8 Propriétés et problèmes du RNs

3.8.1 Problème des valeurs initiales des poids du réseau

Un autre problème est le temps de convergence de l'algorithme de rétro propagation. En effet, plus la somme pondérée des entrées d'un neurone est forte, plus le neurone se trouve dans la zone de saturation de sa fonction d'activation σ (\tanh), donc plus la dérivée σ' est faible (la pente de la fonction σ en zone de saturation), et moins les poids du neurone sont modifiés.

Il faut donc démarrer l'apprentissage en initialisant les poids du réseau à des valeurs suffisamment faibles qui placent la fonction d'activation dans sa zone linéaire: on choisit donc en général des valeurs initiales inférieures à 0,1.

3.8.2 Problème de sur apprentissage

Il faut aussi donner suffisamment d'exemples bien répartis pour que le réseau généralise correctement, mais pas trop pour qu'il ne fasse pas de sur-apprentissage au détriment des capacités de généralisation.

Un moyen simple de vérifier qu'il n'y a pas sur-apprentissage consiste à comparer l'erreur quadratique globale du réseau qui décroît toujours, et l'erreur faite par le réseau sur la base de test qui diminue puis augmente lorsqu'il y a sur-apprentissage. La base de test ne doit jamais servir à l'apprentissage.

3.8.3 Problème de réglage du pas d'apprentissage

Le réglage du pas d'apprentissage $\alpha(t)$ joue aussi un rôle important dans la vitesse de convergence.

Ainsi il est préférable qu'il soit grand au début de l'apprentissage, et diminue au fur et à mesure que le réseau se rapproche de la solution (la valeur du pas d'apprentissage est de l'ordre de 0,1 à 0,001).

3.9 Conclusion

Les réseaux de neurones permettent de résoudre, avec une grande précision, les problèmes de modélisation ou d'identification linéaires et non -linéaires. On dispose d'un système dont on connaît les entrées et les sorties quantitatives. A partir d'un certain nombre d'exemples fournis aux réseaux, ceux-ci apprennent à se comporter comme le système. Une fois cet apprentissage réalisé on obtient des modèles ayant un nombre réduit de paramètres. L'apprentissage de ces réseaux peut ensuite être aisément renforcé sur de nouveaux exemples.

Au-delà de la modélisation et de l'identification, les réseaux de neurones ont un grand nombre d'applications potentielles.

Dans le chapitre 4, les réseaux de neurones seront utilisés pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé.

CHAPITRE 4

APPLICATION DES RÉSEAUX DE NEURONES POUR L'ESTIMATION DE LA VULNÉRABILITÉ

4.1 Introduction

Ce chapitre décrit la méthodologie et l'application des modèles des réseaux de neurones choisis pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions. Ces modèles sont :

- Les RNA linéaire (ADALINE) : Ces RNs sont semblables au perceptron, mais leur fonction de transfert est linéaire plutôt que limiter difficilement, donc la sortie de neurone dépend linéairement des entrées. Cela permet à leurs sorties de prendre toute valeur, alors que la sortie du perceptron est limitée à non plus 0 ou 1. Il s'agit de résoudre un système d'équations linéaire.
- Le réseau de neurones rétropropagation (RPG) : Ce réseau utilise la technique d'apprentissage supervisée, chaque paramètre d'entrée doit être associé à un résultat désiré pour que l'apprentissage soit accompli. Après l'apprentissage, le réseau de neurones doit être testé pour déterminer sa capacité de généralisation.

4.2 Méthodologie

Les étapes suivantes pour établir le réseau de neurones sont décrites dans la figure 4.1. La première étape consiste à identifier les paramètres à utiliser pour l'estimation de la vulnérabilité. Deux ensembles de données sont produit, un pour la phase d'apprentissage et l'autre pour la phase test ou validation en se basent sur le type et la taille de l'ensemble des données d'entrée, les configuration (architecture) du réseau, comme le nombre de

neurones dans l'entrée et les couches cachées, le réseau est entraîné en présentant les données d'entrée au réseau autant de fois nécessaire jusqu'à satisfaction du critère de l'erreur maximale permise.

Une fois la phase d'apprentissage accomplie, le réseau qualifié et testé devrait maintenant prévoir les propriétés requises. Pour examiner la capacité du réseau et généraliser les exemples d'apprentissages, les données prévues pour le test sont présentées et la sortie cible du réseau est comparée avec la sortie désirée.

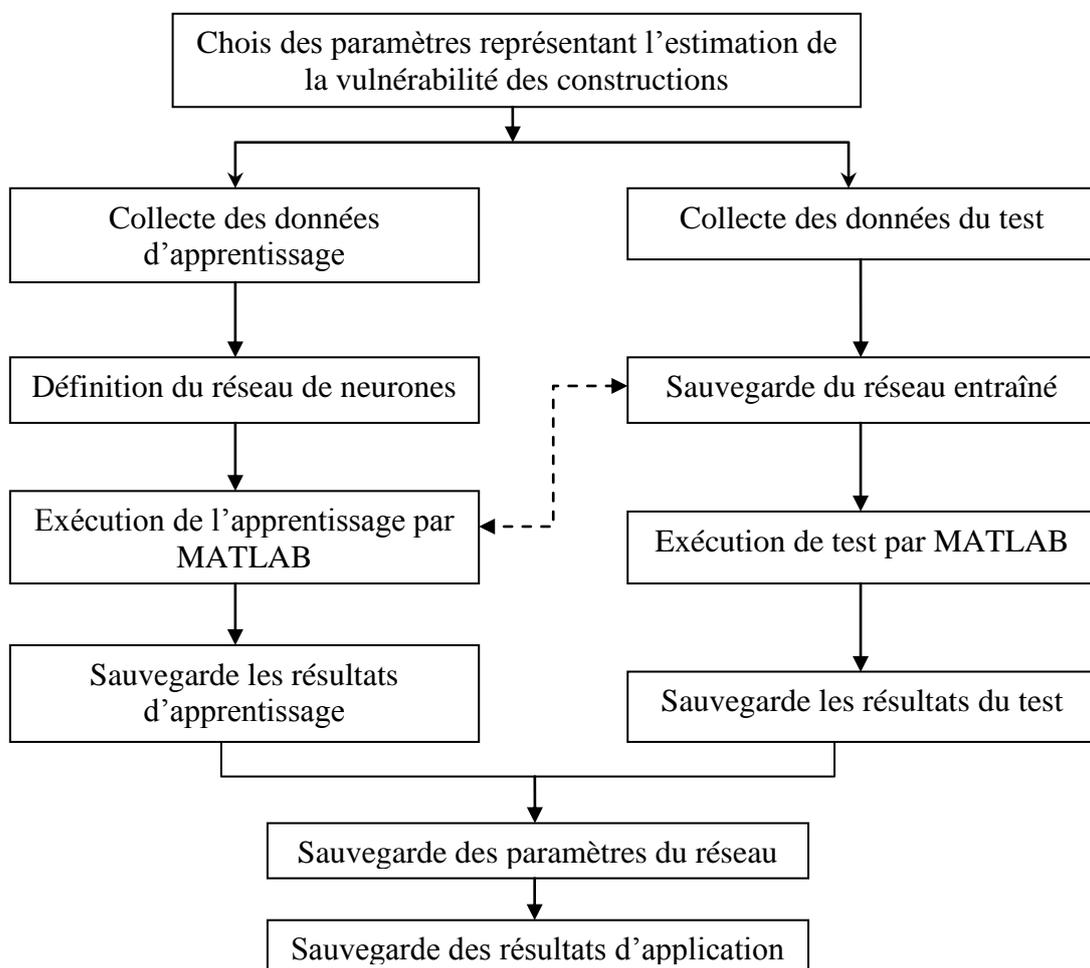


Figure 4.1 : Méthodologie de développement du réseau de neurones.

4.3 Base de données du RNs

L'ensemble des données du réseau de neurones est classé en deux sous-ensembles, un pour l'apprentissage et l'autre pour le test ou la validation. Le nombre et la taille de ces derniers sont définis arbitrairement suivant les sources des données utilisées. Chaque source représente des données expérimentales fournies par des fiches d'évaluation des dommages pour différentes régions en Algérie. La base de données utilisée pour appliquer le RNs est constituée de 130 modèles de fiches d'évaluations des dommages.

La base des données est définie par une matrice ($M \times N$) où M représente les différents paramètres d'estimation de la vulnérabilité et N le nombre des fiches d'évaluation des dommages des constructions. Pour notre étude $M=10$ et $N=130$. Le réseau est basé sur un apprentissage supervisé qui exige la connaissance d'une sortie désirée et associée à chaque modèle. Dans notre cas la sortie est représentée par un vecteur de dimension L qui est le nombre de sorties désirées et associées à chaque fiche d'évaluation.

4.4 Architecture du réseau de neurones linéaire ADALINE

Tel que représenté sur la figure 4.2, l'architecture du réseau linéaire (ADALINE) utilisé dans cette étude est constituée en entrée d'une couche de neurones et en sortie d'une couche de neurones, avec une fonction de transfert purelinéaire (*purelin*).

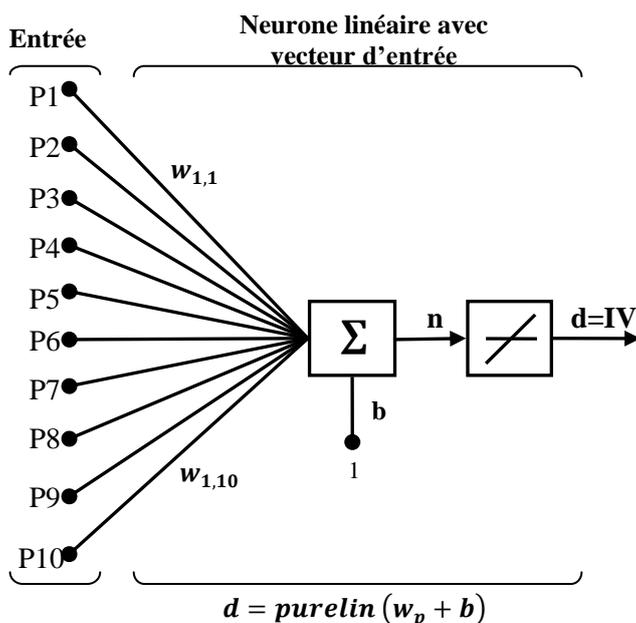


Figure 4.2 : Architecture du réseau de neurones linéaire adapté (ADALINE)

Ce réseau de neurones (ADALINE) a la même structure de base que le perceptron. La seule différence est que le neurone utilise une fonction de transfert (*purelin*).

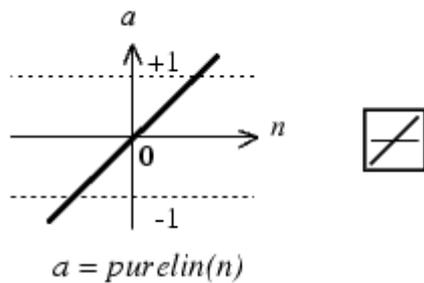


Figure 4.3 : La fonction de transfert linéaire (*purelin*)

Faire l'apprentissage du neurone consiste donc à trouver les poids w_i qui sont solutions de ce système.

$$d = \text{purelin}(n) = \text{purelin}(w_p + b) = w_p + b \quad 4.1$$

Dans ce cas la matrice des poids w a une seule ligne. Donc la sortie du réseau est donnée par

$$d = \sum_{i=1}^{10} p_i w_i + b \quad 4.2$$

Avec

- P_i : les entrées des différents paramètres d'estimation de la vulnérabilité.
- w_i s : les poids correspondant à chaque paramètre d'entrée.
- b : la valeur de biais permettant une fonction de transfert non nulle à l'origine (b est constant).

Dans ce cas, d est la sortie du neurone qui représente dans notre travail le degré d'endommagement ou l'indice de vulnérabilité, cette sortie est reliée par une fonction de transfert pure linéaire (*purelin*).

4.5 Langage de Programmation

Il existe plusieurs simulateurs de réseaux de neurones qui sont développés ces dernières années. Par exemple *Neuro Solutions*, *Neuro Shell*, *Neural*, *Pythia*, etc. Avant de procéder au choix du simulateur pour notre étude, une recherche intensive a été conduite afin d'étudier les avantages et les inconvénients de chaque simulateur. L'interface, l'aide de manipulation, la qualité du produit et la facilité de l'utilisation étaient les critères principaux pour choisir le simulateur le plus adéquat. Parmi les différents langages de programmation tels que le *C++*, *Visual BASIC* le *FORTRAN*, etc., notre choix a porté sur le logiciel MATLAB 7.8.0. Ce dernier caractérise une famille de solutions d'application spécifiques et supplémentaires appelées des boîtes à outils qui permettent d'apprendre et d'appliquer la technologie spécialisée. Les boîtes à outils sont des collections complètes de fonctions MATLAB (M-Files). Ce qui étend l'environnement MATLAB pour résoudre des classes particulières de problèmes. On peut ajouter des boîtes à outils pour le traitement du signal, superviseurs, réseaux neuronaux, logique floue, simulation, et beaucoup d'autres programmes.

MATLAB a évolué sur une période d'années avec une entrée d'un nombre important d'utilisateurs. Dans le cadre de la recherche, c'est l'outil instructif standard pour les cours d'introduction et avancés dans mathématiques, l'ingénierie, la science et dans l'industrie, MATLAB est l'outil de choix pour la recherche, le développement, et l'analyse.

4.5.1 NETWORK DATA MANAGER

L'interface utilisateur graphique GUI est conçue pour être simple et conviviale. Cette fenêtre est construite avec une interface très faciles à utiliser développée pour fonctionner sous Windows. Donc, elle est employée, pour exporter les résultats GUI à l'espace de travail. De la même façon, on peut vouloir importer des résultats de l'espace de travail à la GUI. Une fois la NETWORK/DATA MANAGER est en marche, nous pouvons créer un réseau, le visualiser, le générer, le simuler, et exporter les résultats finaux à l'espace de travail. De la même façon, on peut importer les données de l'espace de travail pour usage dans la GUI.

Pour l'illustration, le panneau principal de NETWORK/DATA MANAGER est montré sur la figure 4.4.

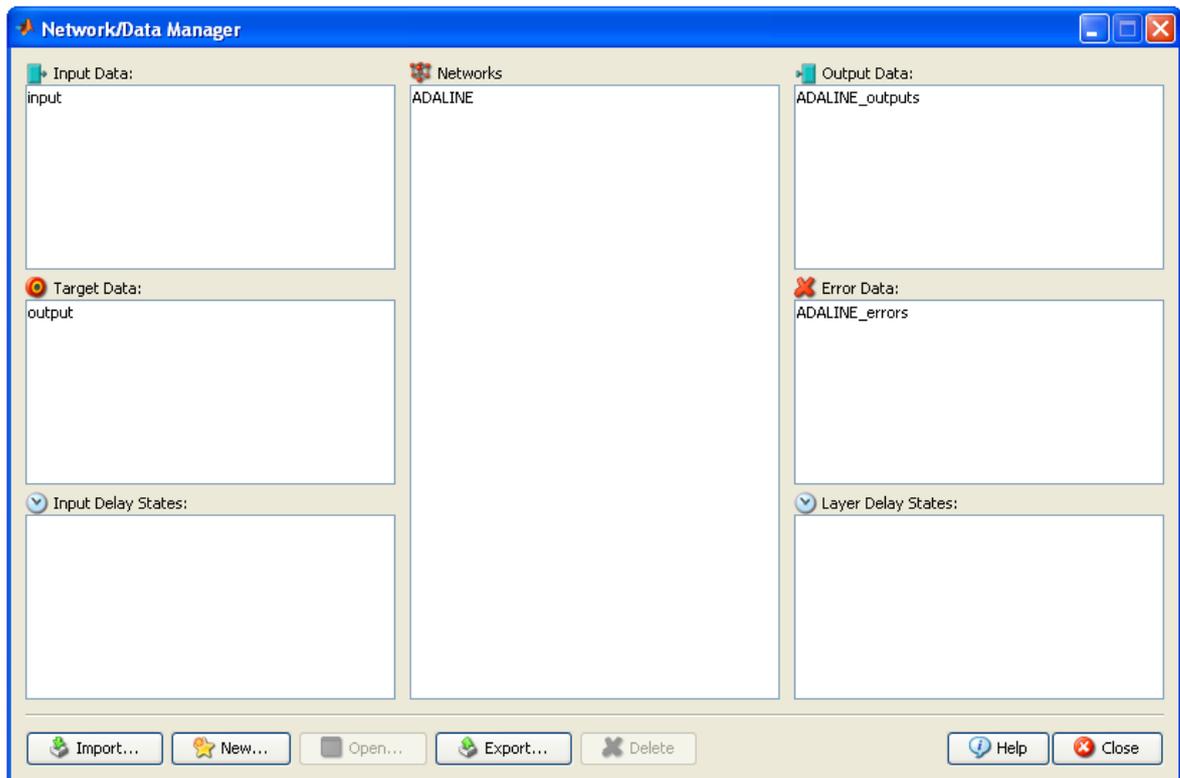


Figure 4.4 : Panneau principal de NETWORK/DATA MANAGER.

Le tableau suivant récapitule la description de chaque bouton et liste du panneau de NETWORK DATA MANAGER.

Tableau 4.1 : Description des boutons et listes du panneau de NETWORK/DATA MANAGER.

Bouton	Description	Liste	Description
Import	- importer les données et les réseaux	Input Data	- Données définissant les entrées de réseau
New Network	- créer un nouveau network	Target Data	- Données définissant les sorties désirées de réseau
Open	- ouvrir le réseau	Input Delay States	- Entrée retardée des états pour des réseaux avec entrée retardée
Export	- exporter les données et les réseaux	Networks	- Type de réseau choisit
Delete	- supprimer les données et les réseaux	Output Data	- Réponse d'un réseau à ses entrées
Help	- ouvrir la fenêtre d'aide.	Error Data	- Différence entre la sortie calculée et la sortie désirée
Close	- fermer l'application de DATA NETWORK MANAGER	Layer Delay States	- Couche retardée des états pour des réseaux avec couche retardée

La figure 4.5 montre le panneau de commande pour la création de nouveaux réseaux de neurones. Ce panneau contient :

- Le nom et le type de réseau à créer
- Les limites de l'entrée
- La fonction d'apprentissage
- La fonction d'adaptation d'apprentissage
- Le type d'erreur
- Le nombre de couches
- Le nombre de neurones dans la couche cachée
- La fonction de transfert correspondant à chaque couche.

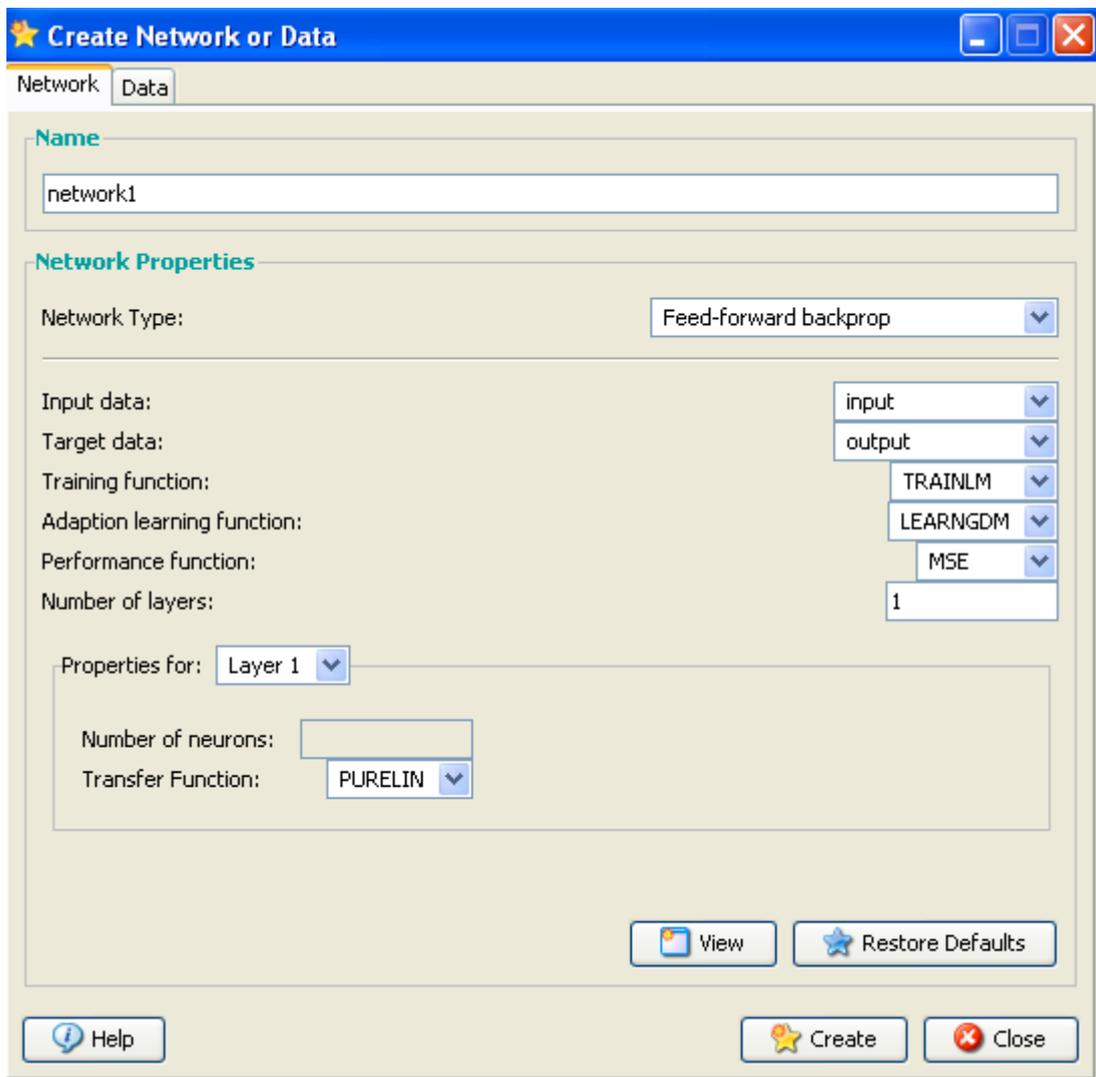


Figure 4.5 : Panneau de commande pour la création du RNs

La figure 4.6 montre également le panneau de commande qui est employé pour entraîner le réseau avec le bouton TRAIN.

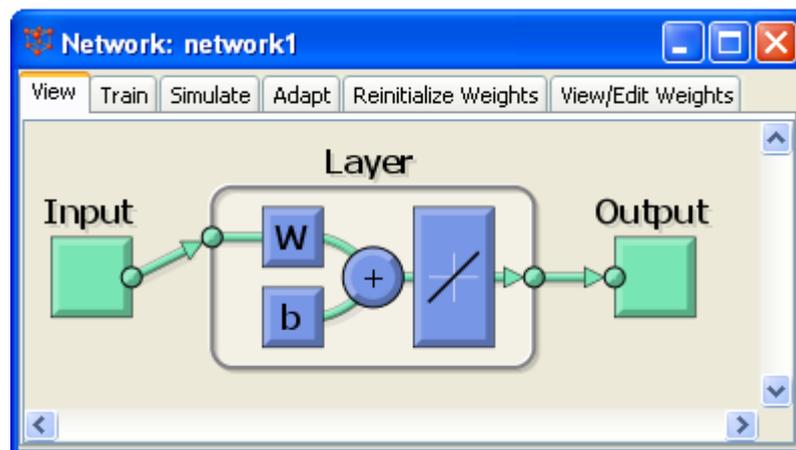
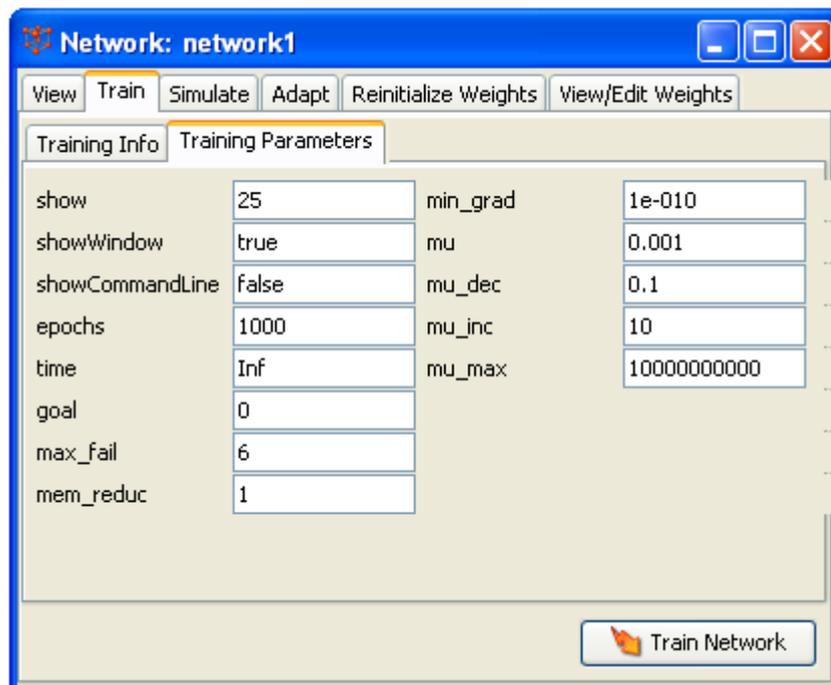


Figure 4.6 : Panneau de commande pour l'apprentissage du RNs.

Ce panneau contient tous les paramètres qui doivent être placés avant l'apprentissage. Certains sont pour l'apprentissage comme : le nombre de cycle pendant l'apprentissage (epoches), la fréquence de vérifier l'erreur d'apprentissage contre l'erreur désirée (goal) et le taux d'apprentissage (mu). D'autres pour l'initialisation des poids (weights), la simulation (simulate) et la visualisation de l'architecture du réseau choisi (view). Le cycle d'apprentissage est représenté par un passage complet par tous les neurones. La fonction d'initialisation randomise tous les poids au début de l'apprentissage des valeurs.

Lors de l'apprentissage une fenêtre apparue représente la diminution de l'erreur produite en comparaison avec l'erreur désirée, le nombre d'itération, le temps d'apprentissage, la performance du réseau et le rapport de régression pour la phase d'apprentissage et le test. Cette fenêtre est représentée sur la figure 4.7.

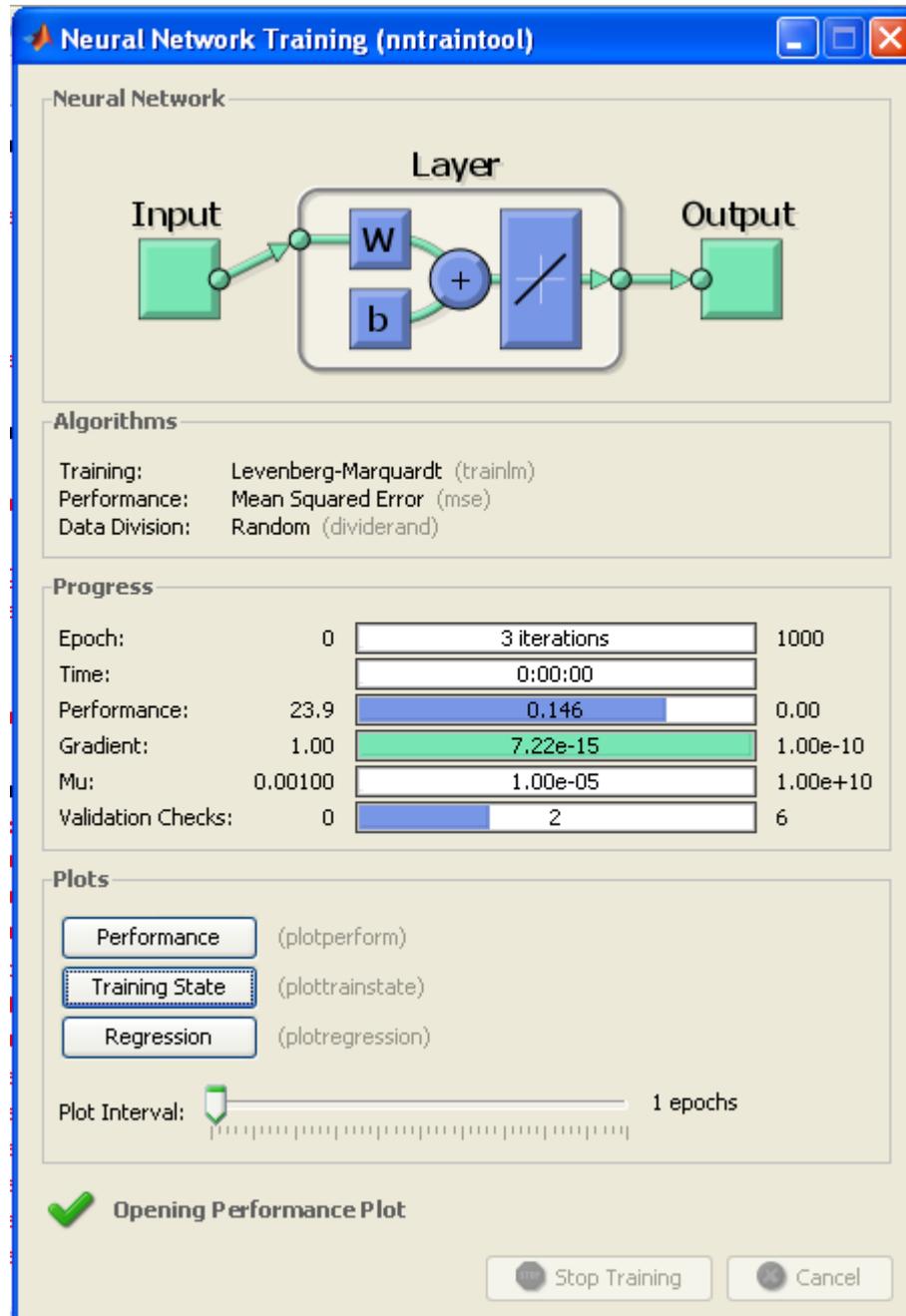


Figure 4.7 : Panneau de visualisation d'apprentissage du réseau de neurones

4.5.2 L'algorithme d'apprentissage

Il est difficile de savoir quel algorithme d'apprentissage sera le plus rapide pour un problème donné. Il dépendra de beaucoup de facteurs, y compris la complexité du problème, du nombre de points de repère dans l'ensemble d'apprentissage, du nombre de poids et de polarisations dans le réseau, et de l'erreur. Pour cette application, plusieurs essais ont été faits par différents algorithmes disponibles dans MATLAB [1] : l'algorithme de Levenberg-Marquardt (TRINGD) à la convergence la plus rapide par rapport aux autres algorithmes (TRAININGDM [39], TRAININGD [39], etc.). La fonction qui est employée pour former le réseau de neurones est la somme des racines moyennes.

4.6 Apprentissage du réseau neurones (ADALINE)

Dans cette étude l'apprentissage du neurone consiste à trouver les poids w_i qui sont la solution du système, et la sortie de neurone dépend linéairement des entrées. Donc il s'agit de résoudre un système d'équations linéaire. L'idée est de présenter au RNs des données d'entrée et de sortie, et de lui faire apprendre la relation entre les deux par un processus appelé apprentissage. Ce dernier consiste à minimiser l'erreur par ajustement des paramètres du modèle. Le processus d'apprentissage se fait généralement en cinq étapes :

- 1- Pondération des entrées par des paramètres appelés poids (W) ;
- 2- Sommation des entrées pondérées ;
- 3- Calcul de la réponse du neurone par la fonction d'activation ;
- 4- Calcul de l'erreur entre la sortie théorique et celle calculée par le RNs ;
- 5- Modification des poids pour minimiser l'erreur par un algorithme mathématique spécifique appelé algorithme d'apprentissage.

4.6.1 Performance des résultats

Lors de l'apprentissage une fenêtre représente la diminution de l'erreur produite pendant chaque cycle d'apprentissage en comparaison avec l'erreur désirée apparue. Cette dernière est représentée sur la figure 4.8.

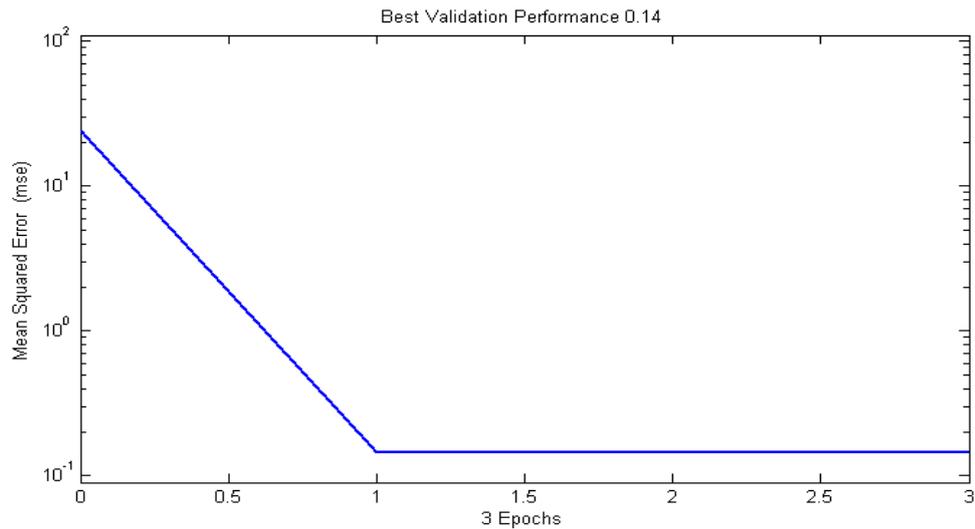
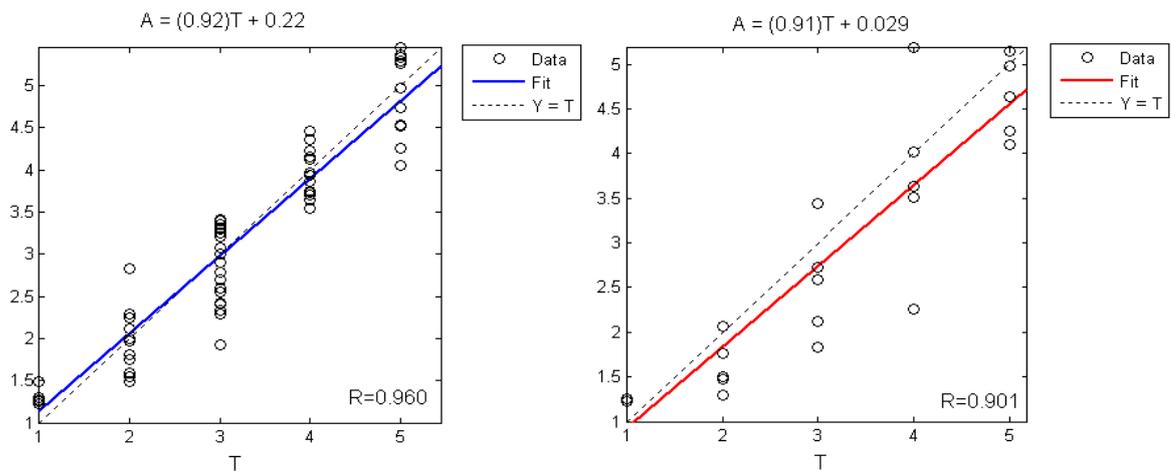


Figure 4.8 : Évaluation de l'erreur par RNs linéaire (ADALINE)

La courbe d'apprentissage (voir figure 4.8) indique que l'exécution du réseau converge rapidement pendant les premières itérations et atteint une limite d'erreur de l'ordre de 0.1



(a) Résultat d'apprentissage

(b) Résultat de test

Figure 4.9: Comparaison de la sortie donnée par le RNs (ADALINE) et la sortie ciblée.

Pour vérifier la qualité du réseau qui forme une régression linéaire entre la réponse du réseau et la sortie désirée, il faut voir le taux de corrélation (R évalué) entre la réponse du réseau et la sortie calculée. Une ligne du mieux allés de toutes les paires de la sortie désirée du réseau (A) et la sortie calculée (T) est présentée dans la figure 4.9. Pour un parfait réseau formé, il faut que tous les points des données soient alignés le long de la diagonale (A=T) et la valeur de R serait égale à un (R=1).

Les résultats d'apprentissage et de test du réseau d'estimation de la vulnérabilité des constructions sont donnés sur la figure 4.9. Cette figure montre significativement l'amélioration des résultats de test, pour toutes les valeurs des paramètres d'estimation de la vulnérabilité de validation.

4.7 Architecture du réseau de neurones RPG

L'architecture du réseau multicouche à rétropropagation (RPG) utilisée dans cette étude est constituée d'une couche de neurones d'entrée, d'une ou plusieurs couches cachées de neurones, d'une couche de sortie, et un ensemble de paramètres qui commandent le processus d'apprentissage tel que le paramètre d'apprentissage (η), et l'erreur quadratique maximale permise (E^2). Pour réduire la complexité du réseau et éviter le temps prolongé d'apprentissage, une seule couche cachée a été choisie. Cependant, le nombre de neurones dans la couche cachée varie proportionnellement avec la taille de la couche d'entrée. La figure 4.10 montre l'architecture du réseau de RPG.

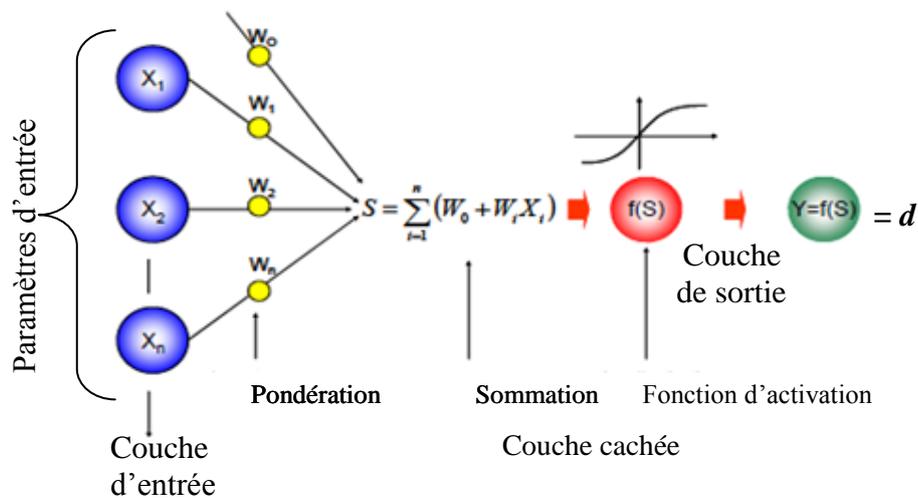


Figure 4.10 : Architecture du réseau RPG adaptée

Divers facteurs peuvent affecter l'exécution du réseau de neurones RPG. Ces facteurs sont liés à la topologie du réseau ou aux caractéristiques de l'ensemble de données d'entrée. Les facteurs qui sont liés à la topologie de réseau incluent le nombre de couches cachées, le nombre de neurones dans la couche cachée, le paramètre d'apprentissage, l'erreur maximale et le nombre permis des cycles d'apprentissage. Dans cette étude le nombre de couches cachées a été choisi afin de rendre le réseau aussi simple que possible, et d'éviter

ainsi, de prolonger le temps d'apprentissage. Cependant, le nombre de neurones dans la couche cachée varie en fonction de la taille de la couche d'entrée.

4.7.1 Effet du nombre de couches cachées et le nombre de neurones dans la couche cachée

Le tableau 4.2 récapitule les effets de variation du nombre de couches cachées du réseau sur sa performance sur la sortie et de voir comment la taille de la couche cachée affecte l'exécution du réseau. Il est à remarquer que le nombre de neurones dans la couche d'entrée est en fonction de la taille du modèle. Ainsi le temps d'apprentissage augmente sensiblement avec le nombre de couches cachées. Les architectures des réseaux de neurones considérés dans cette étude ont eux seulement une seule et deux couches cachées. Cependant, le nombre des neurones dans la couche cachée a été changé pour explorer son effet sur l'exécution du réseau.

Tableau 4.2 : Résumé de l'effet du nombre de couches cachées et le nombre de neurones sur la convergence du réseau RPG

N. C.C	N.N.C.C	Nom	Fonction d'activation	EC/ED	R
01	8	RNs 10-8-1	Tansig-Purelin	0.0463/0.001	90.16%
02	9-7	RNs 10-9-7-1	Tansig-Tansig-Purelin	0.0286/0.001	88.42%
02	10-13	RNs 10-10-13-1	Tansig- Tansig-Purelin	0.0211/0.001	94.57%
01	12	RNs 10-12-1	Tansig-Purelin	0.0267/0.001	83.24%
01	10	RNs 10-10-1	Tansig-Purelin	0.0390/0.001	94.88%
02	10-10	RNs 10-10-10-1	Tansig- Tansig-Purelin	0.0308/0.001	89.24%

N.C.C: nombre de couches cachées ; N.N.C.C : nombre de neurones dans la couche cachée

EC : l'erreur calculée ; ED : l'erreur désirée ; R : coefficient de régression

Les résultats d'apprentissage semblent montrer une légère différence dans l'exécution avec le changement de la taille de la couche cachée. Un réseau avec plus de neurones dans la couche cachée s'exécute mieux. Les résultats prouvent que les réseaux avec un nombre moyen de neurones dans la couche cachée ont légèrement surpassé ceux avec plus de neurones. Autrement dit, les erreurs associées diminuent dans des réseaux à nombre moyen de neurones beaucoup plus rapidement que dans de petits et grands réseaux. Basé sur les observations ci-dessus, l'analyse des résultats obtenus à partir de la phase d'apprentissage et de test conduisent à l'utilisation d'un réseau de taille RNs 10-10-1 pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé.

4.7.2 Performance des résultats

Les erreurs sur l'ensemble d'apprentissage sont conduites aux valeurs relativement petites avec une attention particulière pour éviter l'ajustage d'une précision finie. L'ordre d'entrée entier est présenté au réseau, et ses sorties sont calculées et comparées à l'ordre de cible pour produire un ordre d'erreur. Pour chaque fois que l'étape d'erreur est rétropropagée pour trouver des gradients des erreurs pour chaque poids de polarisation. Ce gradient est réellement une approximation puisque les contributions des poids et des polarisations aux erreurs par l'intermédiaire du raccordement récurrent retardé sont ignorées. Ce gradient est alors employé pour mettre à jour les poids avec la fonction d'apprentissage de rétropropagation. La courbe d'apprentissage est représentée sur la figure 4.11.

La courbe d'apprentissage indique que l'exécution du réseau converge plus rapidement pendant les premières itérations et atteint une limite d'erreur d'ordre de 0,039

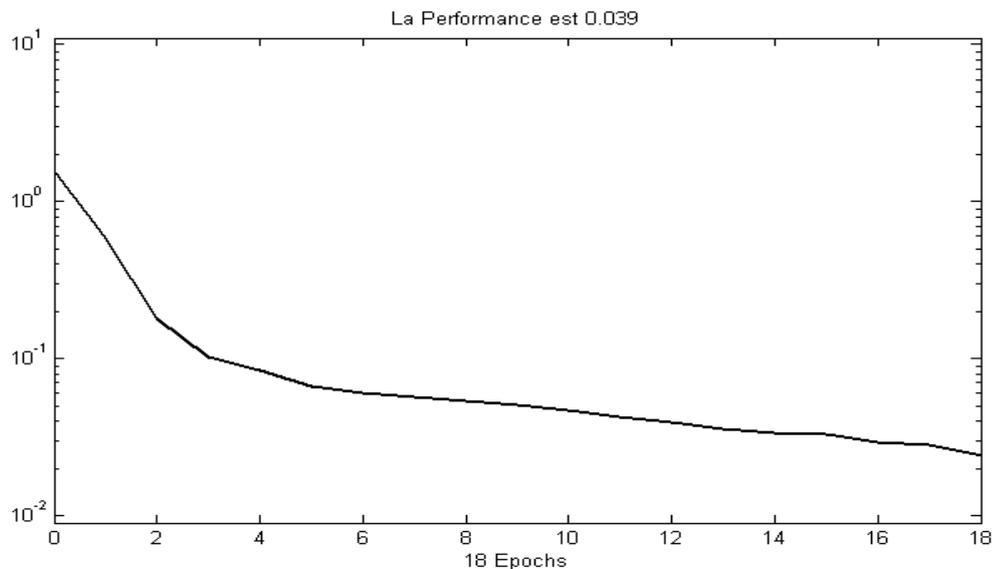
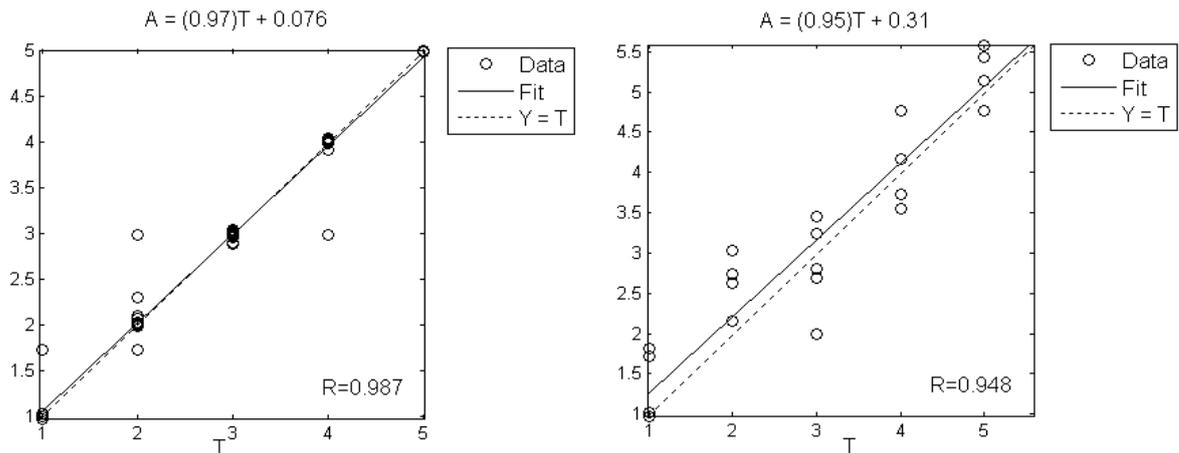


Figure 4.11 : Évaluation de l'erreur par le RPG

Les résultats d'apprentissage et de test du réseau RPG sont montrés sur la figure 4.12. Cette figure montre l'amélioration significative des résultats d'apprentissage et de test, pour toutes les valeurs des paramètres d'estimation de la vulnérabilité de validation.



(a) Résultat d'apprentissage

(b) Résultat de test

Figure 4.12 : Comparaison de la sortie donnée par le RNNs (RPG) et la sortie ciblée.

Les résultats d'apprentissage et de test du réseau d'estimation de la vulnérabilité des constructions sont donnés sur la figure 4.12 on remarque une amélioration des résultats de test.

4.8 Comparaison entre le RNNs (RPG), les RNNs (ADALINE)

À titre de comparaison, nous avons inclus dans notre étude l'algorithme du moindres carrés Moyen (LMS) qui est très utilisé. Il sert à entraîner le réseau ADALINE. Pour des données de nature statique, cet algorithme itératif est équivalent à une régression linéaire multiple et converge asymptotiquement vers la solution optimale au sens de la minimisation de l'erreur quadratique.

Pour chaque architecture, nous avons varié les paramètres de conception pour observer l'effet sur la performance de prédiction. Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié l'impact du nombre de neurones dans la couche cachée. C'est le paramètre par excellence qui permet de sélectionner à volonté la complexité intrinsèque du modèle implémenté par une architecture de réseaux de neurones donnée.

Le tableau 4.3 représente les résultats de comparaison de la régression linéaire multiple par l'ADALINE et le coefficient de régression du modèle de réseau de neurones RPG.

Tableau 4.3 : Comparaison de la régression linéaire multiple par l'ADALINE et le coefficient de régression du modèle de réseau de neurones RPG

Réseau de neurones RPG		Régression linéaire multiple ADALINE	
(R) Apprentissage	(A) Test	(R) Apprentissage	(A) Test
0.98	0.94	0.96	0.90

Une comparaison peut être faite à l'aide du coefficient de régression R. Elle montre que le réseau de neurones RPG a un comportement plutôt similaire au réseau linéaire ADALINE (régression linéaire multiple). Mais on remarque que les RNs (RPG) sont mieux soutenus par des données expérimentales que l'analyse de régression (ADALINE).

4.9 Validation du RNs (RPG)

L'efficacité du modèle de réseau de neurones est évaluée sur la base des possibilités du réseau de simuler exactement la corrélation entre les paramètres d'entrée d'estimation de la vulnérabilité des constructions et la sortie réelle (cible) des fiche d'évaluations des dommages. Après que le réseau de neurones soit entièrement formé pour un ensemble donné de paires d'entrée-sortie, il est examiné en utilisant des paramètres d'entrées qui n'appartiennent pas à l'ensemble d'apprentissage.

Nous avons choisis 11 fiches d'évaluations des dommages pour la validation, qui ne portaient pas à l'ensemble des données, ces fiches sont relevés pour défèrent usage de constructions (logement, commerce, scolaire et etc.).

Pour notre application nous avons les paramètres d'estimation de la vulnérabilité qui représentent les paramètres d'entrées pour le test du réseau de neurones RPG, et on a la sortie cible de chaque type de constructions, cette dernière sera comparée avec la sortie calculée par le réseau de neurones RPG.

Les paramètres d'estimation de la vulnérabilité et la sortie cible de chaque type de constructions est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 4.4 : Les paramètres d'estimation de la vulnérabilité et la sortie cible des constructions choisis pour la validation

	FN° 131	FN° 132	FN° 133	FN° 134	FN° 135	FN° 136	FN° 137	FN° 138	FN° 139	FN° 140	FN° 141
usage de C	log	com	log	log	scol	scol	clin	adm	loge	log	
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P3	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
P4	5	2	1	1	3	4	2	1	1	1	1
P5	5	2	1	1	4	4	2	1	1	1	1
P6	3	2	1	1	3	3	2	1	1	1	1
P7	5	2	2	2	5	5	2	2	2	1	1
P8	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1
P9	3	1	3	1	3	3	1	3	1	3	3
P10	3	1	3	1	1	1	3	3	1	3	3
Couleur	rouge	vert	vert	vert	orange	rouge	orange	orange	vert	vert	vert
Sortie cible	5	2	2	2	4	4	3	3	2	1	1

Une fois la fenêtre Network/Data Manager de logiciel MATLAB est en marche (voir figure 4.13), nous pouvons importer les données finales enregistrées dans l'espace de travail (Workspace) du réseau de neurones (RPG) choisi, après nous devons saisir les paramètres d'estimation de la vulnérabilité d'une construction (Input test) qui représentent les paramètres d'entrées du réseau de neurones.

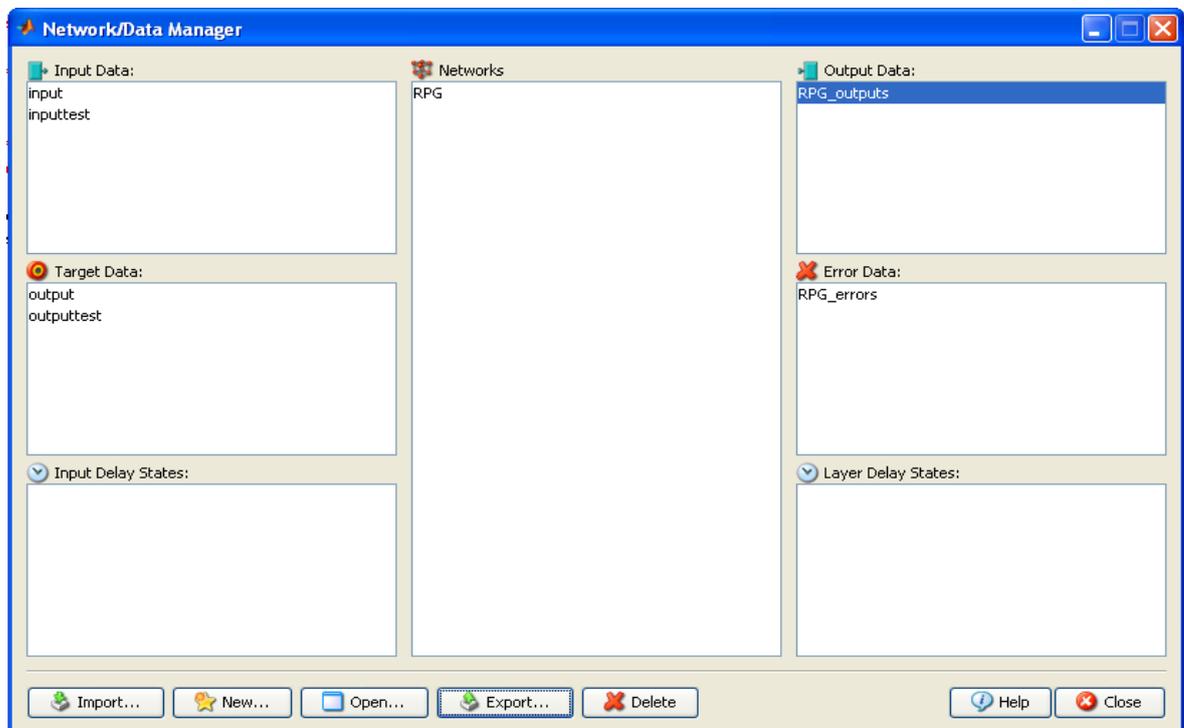


Figure 4.13 : Panneau principal de NETWORK DATA MANAGER pour la simulation.

Par la suite, nous devons ouvrir le réseau de neurones choisi. Une fois la Fenêtre du panneau de commande qui est employé pour entraîner le réseau (ANDN) est en marche, on clique sur le bouton Simulate. On utilise le menu des entrées pour spécifier les paramètres d'estimation de la vulnérabilité comme l'entrée (voir figure 4.14).

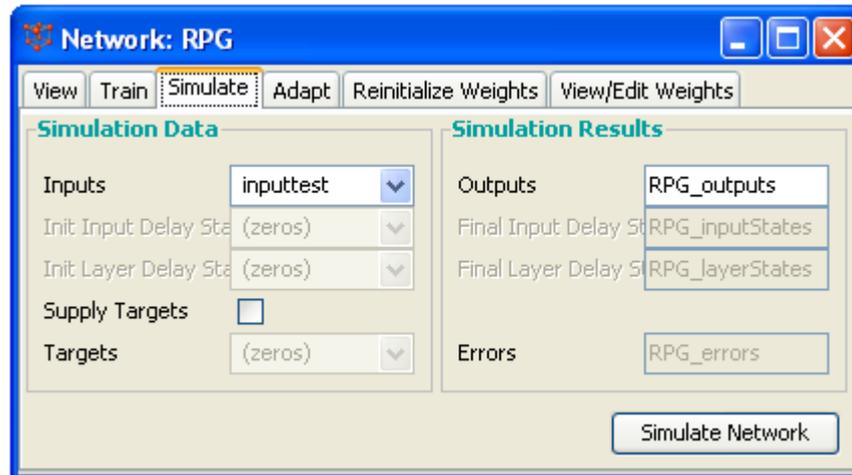


Figure 4.14 : Panneau de simulation

Les résultats obtenus sont regroupés dans la fenêtre Network/Data Manager. Nous pouvons voir une nouvelle variable dans le menu (figure 4.15). Cette variable est la sortie calculée par le réseau de neurones (RPG outputs). Cette dernière représente le taux d'endommagement ou l'indice de vulnérabilité d'une construction.

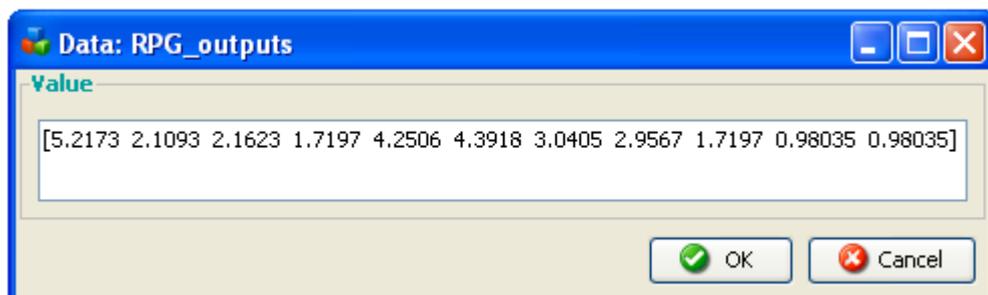


Figure 4.15 : Fenêtre de visualisation de la sortie calculée par le RNs (RPG).

Le tableau suivant montre la sortie calculée par le réseau de neurones et la sortie cible de chaque type de constructions.

Tableau 4.5 : Comparaison de la sortie cible et la sortie calculée par le RNs (RPG).

	F N°131	F N°132	F N°133	F N°134	F N°135	F N°136	F N°137	F N°138	F N°139	F N°140
Sortie cible	5	2	2	2	4	4	3	3	1	1
Couleur	rouge	vert	vert	vert	orange	rouge	orange	orange	vert	vert
Sortie par RPG	5.21	2.10	2.16	1.71	4.25	4.39	3.04	2.95	0.98	0.98
Écart	0.042	0.05	0.08	0.145	0.062	0.097	0.013	0.016	0.02	0.02

Écart = |valeur prédite par le RNs -valeur expérimentale|/ valeur expérimentale

Une comparaison entre les valeurs prédites par réseaux de neurones et les valeurs expérimentales a été effectuée et les écarts-types des erreurs sont présentés au tableau 4.5. En comparant les deux sorties, sortie calculée par le réseau de neurones et la sortie cible, on remarque que les résultats calculés par le réseau de neurones RPG donnent de bonnes prévisions pour notre approche. On peut quantifier la performance de cette comparaison par l'écart entre la valeur prédite par le RNs et la valeur expérimentale, Tel que démontré par nos résultats, ce modèle donne des résultats tout à fait acceptables avec un écart d'une valeur moyenne de 5.45%.

4.10 Conclusion

L'ensemble des résultats obtenus nous permet de conclure que la méthode proposée peut être exploitée pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions. En effet, les réseaux de neurones ont démontré une capacité importante d'apprentissage et de prédiction de la vulnérabilité.

Les réseaux de neurones ont besoin d'un nombre important de données pour être entraînés adéquatement et pour atteindre une convergence statistique satisfaisante. Toutefois, dans la présente étude, le nombre de données disponibles était malheureusement limité. Ceci nous limite quelque peu par conséquent dans nos conclusions. Malgré tout, les résultats obtenus indiquent que les réseaux de neurones peuvent être d'une assistance utile dans l'estimation de la vulnérabilité des constructions.

De façon générale, la méthode présentée est une évaluation plus précise, moins couteuse et plus rapide pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions.

CONCLUSION

Pour prédire les conséquences post-sismiques sur les constructions, il est important de maîtriser les paramètres influents sur la vulnérabilité du bâti. En effet, l'aptitude à pouvoir mesurer le plus fidèlement cette vulnérabilité est primordiale dans la réduction de pertes humaines et matérielles pour des séismes futurs tout en permettant des actions de renforcement de structures existantes et une meilleure gestion de la crise post-sismique.

Plusieurs modèles simples pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé ont été établis sur la base des études de vulnérabilité réalisées aux États-Unis et en Europe. L'applicabilité de ces modèles analytiques aux bâtiments Algériens est possible : le bâti existant Algérien étant assez similaire à celui de l'Italie et de l'Europe, nous avons donc proposé pour la spécification des paramètres de vulnérabilité une approche basée sur la méthode GNDT et des méthodes d'analyse de la vulnérabilité, développées dans des pays à forte sismicité. La méthodologie que nous avons adoptée consiste à estimer le dommage moyen en conformité avec l'échelle européenne EMS98 à partir des fiches d'expertises des constructions dans différentes régions en Algérie. Pour le développement et la validation de cette approche, nous avons utilisé des techniques du domaine de l'intelligence artificielle, plus précisément les réseaux de neurones.

Les Réseaux de Neurones (RNs) sont utilisés pour évaluer la vulnérabilité d'une construction. En effet, un système de RNs avec un ensemble de constructions expertisées est mis en place pour constituer d'abord une phase d'apprentissage et dans une seconde phase, ce système est utilisé pour prédire la vulnérabilité d'un autre ensemble de constructions.

Les données décrivant ces constructions sont choisies de telle manière à englober tous les cas possibles. Le résultat de la phase d'apprentissage est un réseau de neurones avec des valeurs de poids ajustées. A ce niveau, le système RNs peut prédire la vulnérabilité d'une construction connaissant les paramètres qui la définissent.

Pour la première phase, deux réseaux de neurones ont été mis en application, à savoir le réseau linéaire à une couche ADALINE et le réseau multicouche à rétropropagation RPG pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions. Dans la phase apprentissage, nous avons utilisé une base de données de 130 cas de constructions expertisées. Les deux réseaux de neurones ont donné des résultats satisfaisants. L'erreur moyenne de l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé était de 5% pour le réseau de neurones RPG et 10% pour le réseau de neurones ADALINE.

À titre de comparaison, nous avons inclus dans notre étude l'algorithme du moindre carré Moyen (LMS) qui est très utilisé. Ce dernier sert à entraîner le réseau ADALINE. Pour des données de nature statique, cet algorithme itératif est équivalent à une régression linéaire multiple et converge asymptotiquement vers la solution optimale au sens de la minimisation de l'erreur quadratique. Comme conséquence, le réseau de neurones RPG a donné une bonne performance avec un coefficient de régression de 0,98 ; alors que le réseau ADALINE a donné un coefficient de régression de 0,96. Cette comparaison prouve que le RNs RPG donne des résultats meilleurs.

Afin de juger la fiabilité des résultats proposés par le système de réseaux de neurones, nous avons procédé à une seconde phase qui est l'étude de validation. Une autre base constituant 11 constructions expertisées différentes de l'ensemble des données de la phase apprentissage, est utilisée pour simuler les résultats prédits par le RPG. Des résultats satisfaisants ont pu être mis en évidence par rapport à l'exactitude de la prédiction de la vulnérabilité. En effet ce modèle donne des résultats tout à fait acceptables avec un écart d'une valeur moyenne de 5,45% par rapport aux résultats cibles contenus dans les fiches d'expertise.

Sur la base de ces résultats obtenus ; nous pouvons dégager les conclusions suivantes :

- Connaissant les paramètres structuraux et non structuraux d'une construction donnée, le système de réseaux de neurones peut prédire sa vulnérabilité.

- La modélisation de l'estimation de la vulnérabilité exige moins de critères en utilisant la technique des réseaux de neurones.
- Le système de réseaux de neurones conduit vers une prédiction acceptable, moins coûteuse, facile et plus rapide pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions.
- Cette technique donne aux ingénieurs non expérimentés un outil intelligent simple à utiliser pour l'estimation de la vulnérabilité.

Les réseaux de neurones ont besoin d'un nombre important de données pour être entraînés adéquatement et pour atteindre une convergence statistique satisfaisante. Toutefois, dans la présente étude, le nombre de données disponibles était malheureusement limité. Ceci nous limite quelque peu par conséquent dans nos conclusions. Malgré tout, les résultats obtenus indiquent que les réseaux de neurones peuvent être d'une assistance utile dans l'estimation de la vulnérabilité des constructions. Nous recommandons donc que d'autres expériences avec des bases de données beaucoup plus importantes soient menées.

APPENDICE A

LISTE DES SYMBOLES

AG	: Les algorithmes génétiques (Genetic Algorithm)
EC	: l'erreur calculée
ED	: l'erreur désirée
EMS98	: L'Échelle Macrosismique Européenne
GUI	: Interface Utilisateur Graphique
IA	: L'intelligence Artificielle
K	: degré de vulnérabilité selon la Méthode AFPS
LF	: La logique floue (Fuzzy logic)
MSK	: Echelle de Medvedev, Sponheuer, et Karnik
R	: Coefficient de régression
RNs	: Réseaux de neurones
RPG	: Réseau de neurone à rétropropagation
SE	: Les systèmes experts (Expert Systems)
V_i	: L'indice de vulnérabilité
W_i	: Facteurs de pondération
W_{ij}	: Les poids synaptiques du neurone j
b	: Biais
d	: Le dommage
p_i	: Paramètres d'entrées pour le réseau de neurone
x_i	: L'entrée du neurone

- y_j : Sortie de neurone
- $z(t)$: Le potentiel somatique
- $\alpha(t)$: Le coefficient d'apprentissage
- μ_D : Taux de dommage moyen selon le programme RISK-UE
- $\delta_j(t)$: L'erreur faite par le neurone
- $\varepsilon(\vec{w}, k)$: Le critère des moindres carrés
- σ : Fonction d'activation

APPENDICE B

MÉTHODE FEMA 310

Utilisation de check-listes, méthode FEMA 310 (d'après [7])

Région de sismicité	Niveau de performance	Check-listes					
		Sommaire	Structure base	Structure compléments	Sol et fondations	él. non structuraux base	él. non structuraux compléments
Faible	SVH	x					
	FI		x		x	x	
Moyenne	SVH		x		x	x	
	FI		x	x	x	x	x
Forte	SVH		x	x	x	x	
	FI		x	x	x	x	x

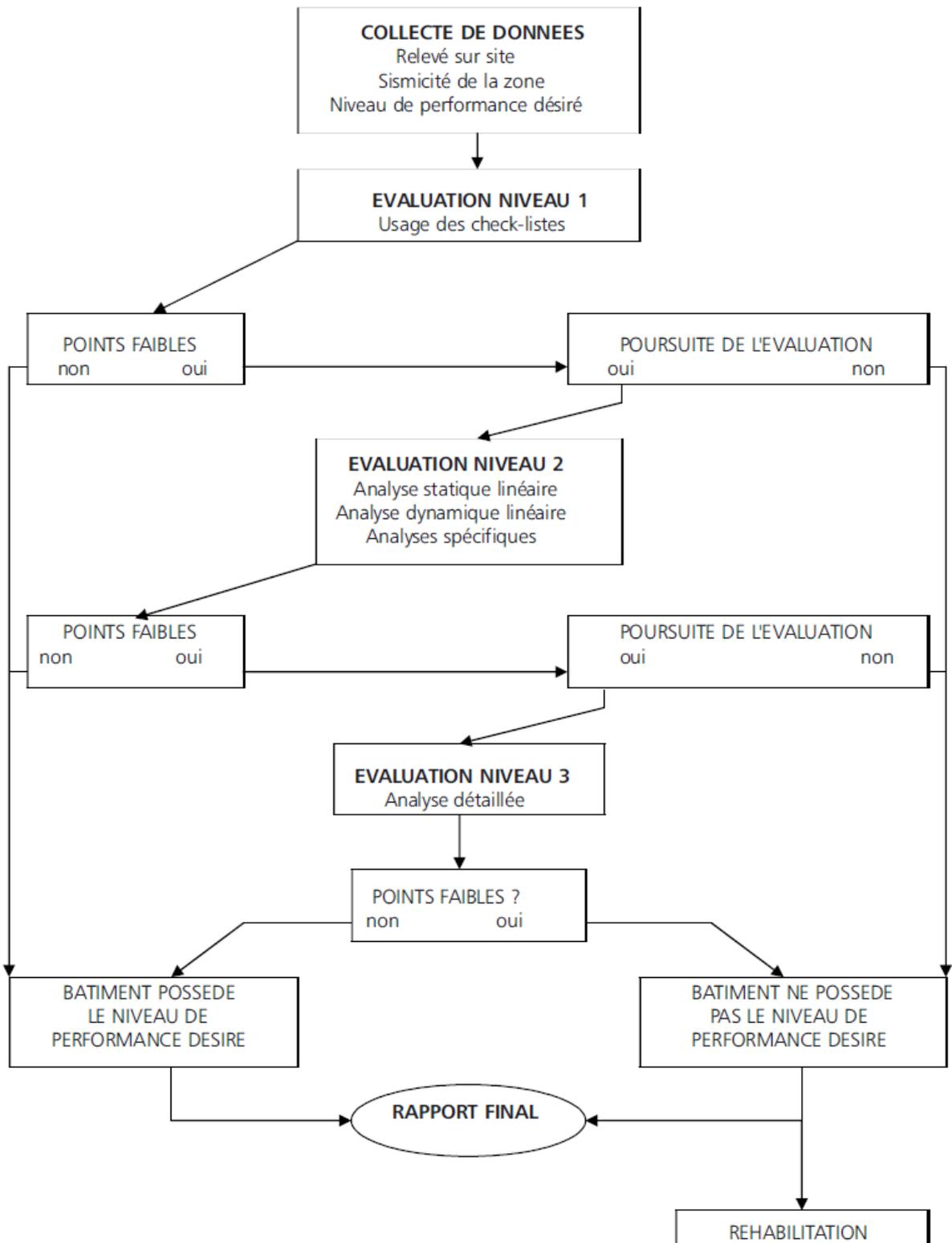
SVH : Sauvegarde des vies humaines

FI : Fonctionnalité immédiate

Sélection du type d'analyse de vulnérabilité, méthode FEMA 310 (d'après [7])

Type de construction	Nombre de niveaux à partir duquel une analyse de niveau 2 ou de niveau 3 (N3) est exigée					
	Sismicité faible		Sismicité moyenne		Sismicité forte	
	SVH	FI	SVH	FI	SVH	FI
Ossatures bois :						
- maisons individuelles	3			3		3
- idem avec grandes portes de garage en rez-de-chaussée	4			3		3
- bât. industriels et commerciaux	3			3		3
Portiques en acier :						
- diaphragmes rigides		4	1		1	
- diaphragmes flexibles	4	1		1		
Ossatures en acier contreventées par triangulation :						
- diaphragmes rigides		4	3		3	
- diaphragmes flexibles		4	3		3	
Portiques transversaux de grande portée en acier		2		2		2
Ossatures en acier contreventées par des voiles						
Ossatures en acier contreventées par des murs en maçonnerie :						
- diaphragmes rigides		3		1		1
- diaphragmes flexibles		3	1		1	
Portiques en béton armé		3	1		1	
Voiles en béton :						
- diaphragmes rigides		5		5		4
- diaphragmes flexibles	5		5		4	
Ossature en béton armé avec remplissages en maçonnerie rigides :						
- diaphragmes rigides		3		1		1
- diaphragmes flexibles		3		1		1
Panneaux préfabriqués en béton armé :						
- diaphragmes rigides		2	1		1	
- diaphragmes flexibles		2	1		1	
Ossatures en béton armé préfabriqué :						
- contreventement par voiles		5	5		4	
- contreventement par effet de portique		1	1		1	
Maçonnerie armée :						
- diaphragmes rigides		4	3		2	
- diaphragmes flexibles		4	1		1	
Maçonnerie non armée :						
- diaphragmes rigides		2		N3		N3
- diaphragmes flexibles		N3	1	N3	1	N3
Systèmes mixtes		3		1		1

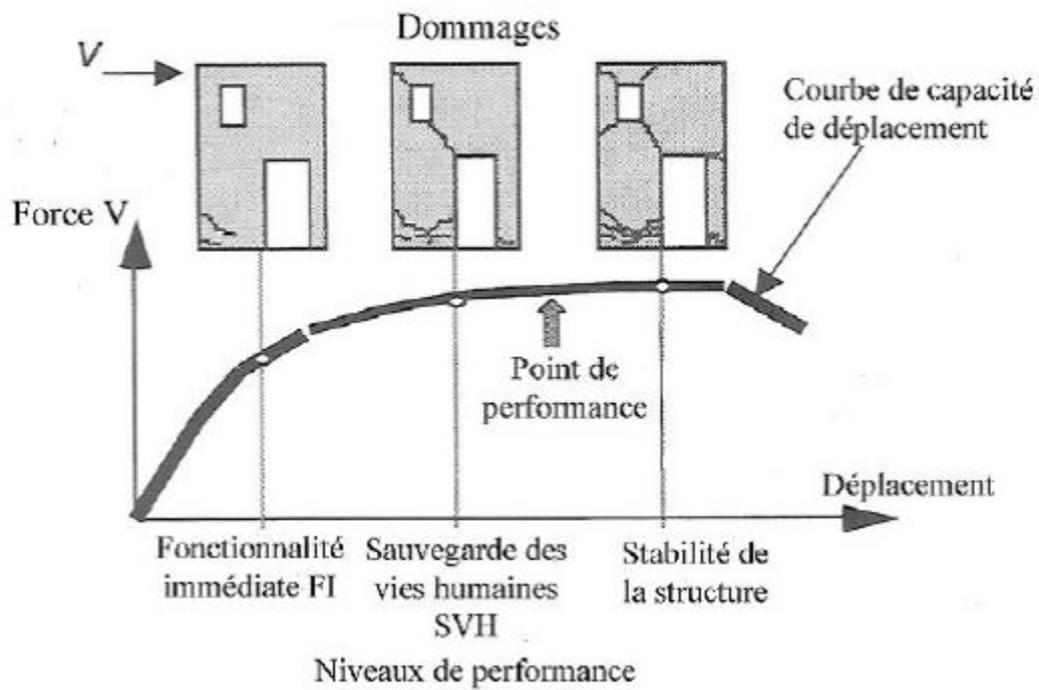
Organigramme de la méthode FEMA 310 (d'après [7])



APPENDICE C

MÉTHODE "ATC 40 "

Courbe de capacité de déplacement d'un bâtiment



Le point de performance correspond au déplacement maximal du bâtiment sous l'action du séisme considéré. Le bâtiment montré est donc vulnérable, car il peut subir des déplacements supérieurs à ceux du niveau de performance minimal exigé (SVH) (d'après [8]).

APPENDICE D

MÉTHODE " AFPS "

Tableau d'évaluation de présomption de vulnérabilité (d'après [9])

EVALUATION QUALITATIVE DE LA PRESOMPTION DE VULNERABILITE

Propriétaire du bâtiment :

Dénomination et adresse du bâtiment :

Année de construction :

Date du diagnostic :

Auteur du diagnostic :

A	1	2	Observations
Implantation du bâtiment	Pente générale du terrain > 40 % 5	Proximité d'un changement de pente D < 2H du bâtiment 15	
Environnement du bâtiment	1 Bâtiments accolés : joint = 0 ou rempli d'un matériau 25	2 Joints entre blocs adjacents < 2 cm 2 à 4 cm > 4 cm 25 10 5	
C	1	2	3
Type de structure	Murs en maçonnerie de blocs 15	Murs en béton non armé 10	Murs en béton armé 5
		4	5
		Ossature Poteaux poutres sans remplissage 20	Ossature Poteaux poutres avec remplissage 25
		6	7
		Système mixte murs en maçonnerie et ossature 20	Panneaux de façade BA préfabriqués porteurs 10
		8	
		Ossature BA préfabriquée porteuse 50	
D	1	2	3
Forme en plan	Irrégulière 5	Élancement en plan L/>4 5	Parties saillantes ou rentrantes 5
E	1	2	3
Forme en élévation	Etages en encorbellement > 2 m 15	Retrait en façade >40 % 20	Planchers d'un même étage situés à des hauteurs différentes 10
			4
			Présence d'un plancher lourd ou d'une toiture lourde 10
			5
			Absence de diaphragme horizontal en toiture 20
F	1	2	3
Contreventement	Variation verticale croissante des rigidités 0 à 100 (voir formule 1)	Dissymétrie : torsion faible : 5 accusée : 50	Absence de contreventement dans le sens des x ou y 100
			4
			Densité de voiles de contreventement sens x ou y 0 à 100 (voir formule 2)
G	1	2	3
Zones ou Éléments critiques	Descente de charge en baïonnette 25	Présence de poteaux courts ou partiellement bridés participant au contreventement 50	Présence de poteaux Élancés 10
			4
			Percements inserts dans les poteaux e>d/3 25
			5
			Percements inserts dans les poutres e>d/3 10
			6
			Percements inserts dans les nœuds e>d/3 50
	7	8	9
	Présence d'un angle de façade affaibli 15	Axes poteaux et poutres non concourants e>c/2 10	Diaphragmes horizontaux avec grandes ouvertures s>10 %S 10
			10
			Absence de chaînages encadrant les murs de contreventement en MAC verticaux : 25 horizontaux : 75
H	1	2	3
Divers	Etat de conservation du gros œuvre médiocre : 10 mauvais : 25	Risque de chute d'éléments non Structuraux 5	Façade BA préfabriquée non porteuse 10
Total des pénalités			

Typologie des dommages sismiques (d'après [9])

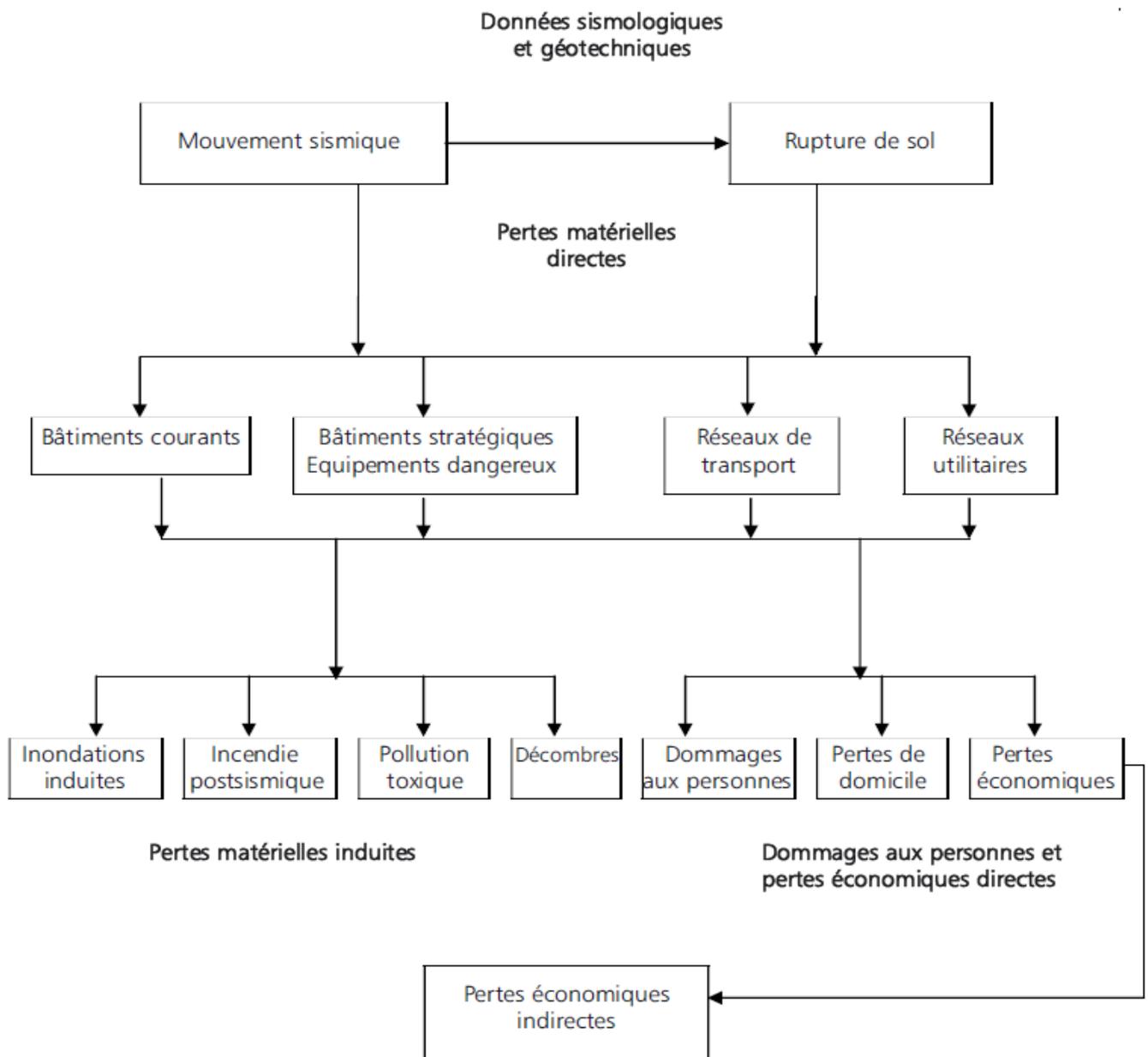
TYPE DE DOMMAGES	NATURE DES DOMMAGES	RÉPARATION	PERTES EN VIES HUMAINES
Nuls à négligeables	Microfissures (1mm) dans quelques cloisons. Fatigue des bâtiments sans signe apparent d'endommagement	Appréciation au cas par cas	Nulles
Légers	Dégâts mineurs aux éléments non structuraux: - fissures dans cloisons de distribution, - chute de plâtras, - chute d'éléments légers de plafonds suspendus	Réparation sans évacuation des occupants	Rares
Modérés	Dégâts importants aux éléments non structuraux ; chute de cheminées Dégâts possibles aux éléments structuraux, fissurés ou plastifiés, mais non détruits	Réparation pouvant nécessiter l'évacuation des occupants	Peu nombreuses
Graves	Dégâts très importants aux éléments non structuraux, rupture ou effondrement localisé d'éléments structuraux	Expertise pour décision de réparer ou non	Possibilité de pertes nombreuses
Effondrement	Effondrement partiel ou total du bâtiment	Réparation lourde ou non envisageable	Possibilité de pertes très nombreuses

Grille de présentation des résultats de l'évaluation de vulnérabilité (d'après [9])

NATURE DU SEISME	NATURE DES DOMMAGES				
	Négligeables	Légers	Modérés	Graves	Effondrement
(VII) Faible (0.1g)					
(VIII) Moyen (0.2g)					
(IX) Fort (0.4g)					

APPENDICE E
GUIDE HAZUS 99

Organigramme de l'analyse du risque sismique urbain (d'après [11])



APPENDICE F
MÉTHODOLOGIE RISK-UE

Matrice des typologies de bâtiment et valeurs de V_i (d'après [12])

Code	Typologie	V_{\min}	V_i	V_i	V_{i+}	V_{\max}
M1	Murs porteurs en maçonnerie de pierres composées de :					
M1.1	Moellons	0,62	0,81	0,873	0,98	1,02
M1.2	Pierres appareillées	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M1.3	Pierres de taille	0,3	0,49	0,616	0,793	0,86
M2	Adobe	0,62	0,687	0,84	0,98	1,02
M3	Murs porteurs en maçonnerie non armée:					
M3.1	Plancher en bois	0,46	0,65	0,74	0,83	1,02
M3.2	Voûtes en maçonnerie	0,46	0,65	0,776	0,953	1,02
M3.3	Planchers avec poutrelles métalliques et maçonnerie	0,46	0,527	0,704	0,83	1,02
M3.4	Plancher en béton armé	0,3	0,49	0,616	0,793	0,86
M4	Murs porteurs en maçonnerie armée ou confinée	0,14	0,33	0,451	0,633	0,7
M5	Constructions en maçonnerie renforcées dans leur ensemble	0,3	0,49	0,694	0,953	1,02
M5	Constructions en maçonnerie renforcées dans leur ensemble	-0,02	0,047	0,442	0,8	1,02
RC2	Murs de refend en béton	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
RC3.1	Système poteaux/poutres avec mur de remplissage en maçonnerie non armée Structures régulières	-0,02	0,007	0,402	0,76	0,98
RC3.2	Système poteaux/poutres avec mur de remplissage en maçonnerie non armée Structures irrégulières	0,06	0,127	0,522	0,88	1,02
RC4	Structure mixte en béton armé (portiques et murs en béton)	-0,02	0,047	0,386	0,67	0,86
RC5	Murs en béton préfabriqué	0,14	0,207	0,384	0,51	0,7
RC6	Structure en béton préfabriqué avec murs de refend en béton	0,3	0,367	0,544	0,67	0,86
S1	Système poteaux/poutres en acier	-0,02	0,467	0,363	0,64	0,86
S2	Structure en acier contreventé	-0,02	0,467	0,287	0,48	0,7
S3	Système poteaux/poutres en acier avec mur de remplissage en maçonnerie non armée	0,14	0,33	0,484	0,64	0,86
S4	Système poteaux/poutres en acier avec mur de refend béton coulés en place	-0,02	0,047	0,224	0,35	0,54
S5	Système de composant acier et béton armé	-0,02	0,257	0,402	0,72	1,02
W	Structure en bois	0,14	0,207	0,447	0,64	0,86

Facteurs aggravant pour les bâtiments en acier et béton armé (d'après [12])

Facteurs aggravants pour les bâtiments RC et acier	Facteurs de vulnérabilité		Code Bas	Code Moyen
	Nb d'étages	Bas (1, 2 ou 3)	-0,04	-0,04
		Moyen (4, 5 ou 6)	0	0
		Haut (7 ou plus)	+0.08	+0.06
Irrégularité en plan	Forme (L, C)	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
	Protubérance	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
Irrégularité élévation	Saillie	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
	Retrait	Oui	+0.02	+0.01
		Non	0	0
Joints insuffisants (non PS)	Oui	+0.04	0	
	Non	0	0	
Poteaux courts	Oui	+0.02	+0.01	
	Non	0	0	
Règles PS	Avant 1982 : L	+0.16		
	Après 1982 : M		0	

Facteurs aggravant pour les bâtiments en maçonnerie (d'après [12])

Facteurs aggravants pour les bâtiments en maçonnerie	Facteurs de vulnérabilité		
	État d'entretien	B = bon	-0.04
		M = mauvais	+0.04
	Nb d'étages	Bas (1 ou 2)	-0.04
		Moyen (3, 4 ou 5)	0
		Haut (6 ou plus)	+0.04
Irrégularité en plan	Forme (L, C)	Oui	+0.02
		Non	0
	Protubérances	Oui	+0.02
		Non	0
Irrégularité élévation	Saillie	Oui	+0.01
		Non	0
	Retrait	Oui	+0.01
		Non	0
Interaction entre bâtiment	Position dans l'îlot	A = angle	+0.04
		M = milieu	-0.04
		T = tête d'îlot	+0.06
	Différence de hauteur/voisin	Oui	+0.02
		Non	0
	Irrégularité en toiture	Oui	+0.04
		Non	0
	Décalage de plancher	Oui	+0.04
	Transparence - démolition	Oui	+0.04
	Balcons - cheminées	Oui	+0.01
Étages: haut. différente	Oui	+0.04	
	Non	0	

APPENDICE G

FICHE TECHNIQUE DE LA MÉTHODE GNDT 1^{er} ET 2^{ème} NIVEAU

GRUPPO NAZIONALE PER LA DIFESA DAI TERREMOTI (G.N.D.T.) – C.N.R.

Scheda di 1° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici



<p>Sezione 1 – DATI RELATIVI ALLA SCHEDA</p> <p>Codice ISTAT Provincia 1 <input type="text"/></p> <p>Codice ISTAT Comune 3 <input type="text"/></p> <p>Comune <input type="text"/></p>	<p>Scheda n° 6 <input type="text"/></p> <p>Data 11 <input type="text"/></p> <p>Squadra 17 <input type="text"/></p> <p>Prescheda N° <input type="text"/></p>																																																																										
<p>Sezione 2 – LOCALIZZAZIONE EDIFICIO</p> <p>Codice ISTAT sezione Censuaria 19 <input type="text"/></p> <p>RIFERIMENTO CATASTALE Foglio 22 <input type="text"/> Mappale 25 <input type="text"/> Particella 28 <input type="text"/></p> <p>CARTOGRAFIA DI RILEVAZIONE Foglio 32 <input type="text"/> Aggregato strutturale 34 <input type="text"/> Edificio 38 <input type="text"/></p> <p>URBANISTICA Zona di piano 40 <input type="text"/> Piano attuativo 41 <input type="text"/> Vincoli 42 <input type="text"/></p>	<p>Aggregato strutturale <input type="text"/> Edificio <input type="text"/></p> <p>0 via, viale 1 corso 2 vicolo 3 piazza, largo 43 <input type="text"/></p> <p>4 località</p> <p>Nome 44 <input type="text"/></p> <p>N° civico 56 <input type="text"/></p> <p>N° accessi 60 <input type="text"/> N° fronti a comune 62 <input type="text"/></p>																																																																										
<p>Sezione 3 – DATI METRICI</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Superficie media coperta (mq) N° piani a superficie media coperta uguale</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Altezza media interpiano (m) N° piani ad altezza media interp. uguale</p> </div> </div>	<p>Altezza massima fuori terra valutata alla gronda (m) 98 <input type="text"/></p> <p>Altezza minima fuori terra valutata alla gronda (m) 101 <input type="text"/></p> <p>Larghezza stradale fronte principale (m) 104 <input type="text"/></p>																																																																										
<p>Sezione 4 – USO</p> <p>Totale unità d'uso 106 <input type="text"/></p> <p>Stato dell'edificio 108 <input type="text"/> F finito N non finito C in costruzione</p> <p>Condizioni d'uso 109 <input type="text"/> 1 totalmente utilizzato 2 parzialmente utilizzato 3 non utilizzato 4 abbandonato</p>	<p>Proprietà 110 <input type="text"/></p> <p>Conduzione prevalente 111 <input type="text"/> 1 diretta 2 in locazione</p>																																																																										
<p>Residenza 1 si 2 no 112 <input type="text"/> Abitazioni occupate N° 113 <input type="text"/> Sup.% 115 <input type="text"/> Abitazioni libere N° 116 <input type="text"/> Sup.% 118 <input type="text"/> Abitazioni occup. salt. N° 119 <input type="text"/> Sup.% 121 <input type="text"/></p>																																																																											
<p>Att. produttive 122 <input type="text"/> 1 si 2 no Servizi pubblici 123 <input type="text"/> 1 si 2 no Denomin. edificio 124 <input type="text"/></p>																																																																											
<p>Unità d'uso</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>N°</th> <th>Codice</th> <th>Tipo</th> <th>Sup.%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>138</td><td>140</td><td>143</td><td>144</td></tr> <tr><td>160</td><td>162</td><td>165</td><td>166</td></tr> <tr><td>182</td><td>184</td><td>187</td><td>188</td></tr> <tr><td>204</td><td>206</td><td>209</td><td>210</td></tr> <tr><td>226</td><td>228</td><td>231</td><td>232</td></tr> <tr><td>248</td><td>250</td><td>253</td><td>254</td></tr> </tbody> </table>	N°	Codice	Tipo	Sup.%	138	140	143	144	160	162	165	166	182	184	187	188	204	206	209	210	226	228	231	232	248	250	253	254	<p>Intensità d'uso</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Periodo di utilizzazione</th> <th colspan="2">Utilizzazione Potenziale</th> <th rowspan="2">h/gg</th> <th rowspan="2">Bacino Di utenza</th> </tr> <tr> <th>Mesi</th> <th>giorni</th> <th>media</th> <th>max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>145</td><td></td><td>150</td><td></td><td>157</td><td>159</td></tr> <tr><td>167</td><td></td><td>172</td><td></td><td>179</td><td>181</td></tr> <tr><td>189</td><td></td><td>194</td><td></td><td>201</td><td>203</td></tr> <tr><td>211</td><td></td><td>216</td><td></td><td>223</td><td>225</td></tr> <tr><td>233</td><td></td><td>238</td><td></td><td>245</td><td>247</td></tr> <tr><td>255</td><td></td><td>260</td><td></td><td>267</td><td>269</td></tr> </tbody> </table>	Periodo di utilizzazione		Utilizzazione Potenziale		h/gg	Bacino Di utenza	Mesi	giorni	media	max	145		150		157	159	167		172		179	181	189		194		201	203	211		216		223	225	233		238		245	247	255		260		267	269
N°	Codice	Tipo	Sup.%																																																																								
138	140	143	144																																																																								
160	162	165	166																																																																								
182	184	187	188																																																																								
204	206	209	210																																																																								
226	228	231	232																																																																								
248	250	253	254																																																																								
Periodo di utilizzazione		Utilizzazione Potenziale		h/gg	Bacino Di utenza																																																																						
Mesi	giorni	media	max																																																																								
145		150		157	159																																																																						
167		172		179	181																																																																						
189		194		201	203																																																																						
211		216		223	225																																																																						
233		238		245	247																																																																						
255		260		267	269																																																																						

Scheda di 1° livello per il rilevamento dell'esposizione e della vulnerabilità degli edifici

Sezione 5 – ETÀ DELLA COSTRUZIONE – INTERVENTI				Sezione 6 – STATO DELLE FINITURE E IMPIANTI																																	
Classi di età				INTERVENTI																																	
A	prima del	19		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Norme sismiche precedenti</td><td>A</td><td>B</td><td>/</td><td>C</td><td>Ampliamento</td> </tr> <tr> <td>Adeg. Antisism. D.M. 24/11/86</td><td>D</td><td>E</td><td>/</td><td>F</td><td>Sopraelevazione</td> </tr> <tr> <td>Migli. Antisism. D.M. 24/11/86</td><td>G</td><td>H</td><td>I</td><td>J</td><td>Ristrutturazione</td> </tr> <tr> <td></td><td>K</td><td>L</td><td>M</td><td>N</td><td>Restauro</td> </tr> <tr> <td></td><td>O</td><td>/</td><td>P</td><td>Q</td><td>Manutenzione</td> </tr> </table>				Norme sismiche precedenti	A	B	/	C	Ampliamento	Adeg. Antisism. D.M. 24/11/86	D	E	/	F	Sopraelevazione	Migli. Antisism. D.M. 24/11/86	G	H	I	J	Ristrutturazione		K	L	M	N	Restauro		O	/	P	Q	Manutenzione
Norme sismiche precedenti	A	B	/					C	Ampliamento																												
Adeg. Antisism. D.M. 24/11/86	D	E	/					F	Sopraelevazione																												
Migli. Antisism. D.M. 24/11/86	G	H	I					J	Ristrutturazione																												
	K	L	M					N	Restauro																												
	O	/	P					Q	Manutenzione																												
B	'19	'45																																			
C	'46	'60																																			
D	'61	'71																																			
E	'72	'81																																			
F	'82	'91																																			
G	'92	'01																																			
H																																					
				Classe di età di costr. <input type="text" value="270"/>																																	
				Classe di età ultimo intervento significat. <input type="text" value="271"/>																																	
				Tipo ultimo int. signif. <input type="text" value="272"/>																																	
				R = in deroga (Art.30 L. 64/74)																																	
				E Efficiente Intonaci e paramenti esterni <input type="text" value="273"/>																																	
				N Non efficiente Infissi esterni <input type="text" value="274"/>																																	
				Z Non esistenti Impianto elettrico <input type="text" value="275"/>																																	
				Impianto idrico <input type="text" value="276"/>																																	
				Finiture interne (intonaci, pavim., ...) <input type="text" value="277"/>																																	
				Riscaldamento <input type="text" value="278"/>																																	
				Servizi igienici <input type="text" value="279"/>																																	

Sezione 7 – TIPOLOGIA STRUTTURALE

Strutture verticali	<ul style="list-style-type: none"> A Muratura a sacco B Muratura a sacco con ricorsi, spigoli, mazzette C Muratura pietra sbazzata D Muratura pietra sbazzata con ricorsi, spigoli, mazzette E Muratura pietre arrotondate F Muratura pietre arrotondate con ricorsi, spigoli, mazzette G Muratura blocchetti tufo, pietra ben squadrate H Muratura blocchetti calcestruzzo inerti pesanti I Muratura blocchetti calcestruzzo inerti leggeri L Muratura mattoni pieni o multifori M Muratura mattoni forati N Pareti calcestruzzo non armato O Pareti calcestruzzo armato P Telai di c.a. non tamponati Q Telai di c.a. con tamponature deboli R Telai di c.a. con tamponature consistenti S Ossatura metallica T Miste U <input type="text" value=""/> V <input type="text" value=""/> 	Strutture orizzontali	<ul style="list-style-type: none"> A Legno B Legno con catene C Putrelle e voltine o tavelloni D Putrelle e voltine o tavelloni con catene E Laterocemento o solette in c.a. F Volte senza catene G Volte con catene H Miste volte solai I Miste volte solai con catene L <input type="text" value=""/> 																																																																						
Scale	<ul style="list-style-type: none"> 0 Struttura appoggiata in legno 1 Struttura a sbalzo in legno 2 Struttura appoggiata in acciaio 3 Struttura a sbalzo in acciaio 4 Struttura appoggiata in pietra o laterizio 5 Struttura a sbalzo in pietra o laterizio 6 Volta appoggiata in muratura 7 Volta a sbalzo in muratura 8 Struttura appoggiata in c.a. 9 Struttura a sbalzo in c.a. 	Coperture	<ul style="list-style-type: none"> M Legno spingente N Legno "poco spingente" (vedi manuale) O Legno a spinta eliminata o travi orizzontali P Laterocemento o solette in c.a. Q Acciaio spingente R Acciaio non spingente S Mista spingente T Mista non spingente U <input type="text" value=""/> 																																																																						
		Tipologia strutturale prevalente <input type="text" value="280"/>																																																																							
		<ul style="list-style-type: none"> 1 Tipologia specialistica (capannoni, chiese, ...) 2 Muratura o mista 3 Calcestruzzo armato 4 acciaio 5 altro 																																																																							
		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">281</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">285</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">289</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">293</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">297</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Verticale</td> <td style="text-align: center;">Scale</td> <td style="text-align: center;">Orizz. e cop.</td> <td colspan="7"></td> </tr> </table>												281										285										289										293										297										Verticale	Scale	Orizz. e cop.							
281																																																																									
285																																																																									
289																																																																									
293																																																																									
297																																																																									
Verticale	Scale	Orizz. e cop.																																																																							

Sezione 8 – ESTENSIONE E LIVELLO DEL DANNO

Evento in data <input type="text" value="301"/>																																																																																																																											
1 sisma <input type="text" value="307"/>	2 altro <input type="text" value=""/>	M = livello danno max rilevato E = estensione danno più diffuso L = livello danno più diffuso																																																																																																																									
Livello del danno	Estensione del danno																																																																																																																										
A Nessun danno B Danno lieve C Danno medio D Danno grave E Danno gravissimo F Danno totale	0 ≤ 10% 1 10< ≤ 20% 2 20< ≤ 30% 3 30< ≤ 40% 4 40< ≤ 50% 5 50< ≤ 60% 6 60< ≤ 70% 7 70< ≤ 80% 8 80< ≤ 90% 9 90<																																																																																																																										
Danni a impianti <input type="text" value="388"/>	1 si <input type="text" value=""/>	2 no <input type="text" value=""/>																																																																																																																									
		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">308</td><td style="text-align: center;">M</td><td style="text-align: center;">E</td><td style="text-align: center;">L</td><td style="text-align: center;">N°</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">312</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">316</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">320</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">324</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> Strutture verticali											308	M	E	L	N°						312										316										320										324										<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">328</td><td style="text-align: center;">M</td><td style="text-align: center;">E</td><td style="text-align: center;">L</td><td style="text-align: center;">N°</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">332</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">336</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">340</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">344</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> Strutture orizzontali											328	M	E	L	N°						332										336										340										344									
308	M	E	L	N°																																																																																																																							
312																																																																																																																											
316																																																																																																																											
320																																																																																																																											
324																																																																																																																											
328	M	E	L	N°																																																																																																																							
332																																																																																																																											
336																																																																																																																											
340																																																																																																																											
344																																																																																																																											
		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">348</td><td style="text-align: center;">M</td><td style="text-align: center;">E</td><td style="text-align: center;">L</td><td style="text-align: center;">N°</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">352</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">345</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">360</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">364</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> Scale											348	M	E	L	N°						352										345										360										364										<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td><td style="width:10%;"></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">368</td><td style="text-align: center;">M</td><td style="text-align: center;">E</td><td style="text-align: center;">L</td><td style="text-align: center;">N°</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">372</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">376</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">380</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr> <td style="text-align: center;">384</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> Tamponature											368	M	E	L	N°						372										376										380										384									
348	M	E	L	N°																																																																																																																							
352																																																																																																																											
345																																																																																																																											
360																																																																																																																											
364																																																																																																																											
368	M	E	L	N°																																																																																																																							
372																																																																																																																											
376																																																																																																																											
380																																																																																																																											
384																																																																																																																											

G.N.D.T. – SCHEDA DI VULNERABILITÀ DI 2° LIVELLO (MUTATURA)



PARAMETRI		Classi	Qual. Inf.	ELEMENTI DI VALUTAZIONE	SCHEMI – RICHIAMI
Codice ISTAT Provincia ¹		Codice ISTAT Comune ³		Sq.	Scheda N° ⁷
1	TIPO ED ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA RESISTENTE (S.R.)	11	22	Norme nuove costruzioni (Clas. A) ³³ <input type="text" value="1"/> Norme riparazioni (Clas. A) <input type="text" value="2"/> Cordoli e catene tutti i livelli (Clas. B) <input type="text" value="3"/> Buoni ammorsam. fra muri (Clas. C) <input type="text" value="4"/> Senza cordoli cattivi ammors. (Clas. D) <input type="text" value="5"/>	Parametro 3. Resistenza convenzionale Tipologia strutture verticali τ_x (t/mq) Minimo tra A_x ed A_y A (mq) <input type="text" value="0"/> Massimo tra A_x ed A_y B (mq) <input type="text" value="0"/> Coeff. $a_0 = A/A_t$ <input type="text" value="0.000"/> Coeff. $\gamma = B/A$ <input type="text" value="0.000"/> $q = (A_x + A_y) h p_m / A_t + p_s$ <input type="text" value="0.000"/> $C = \frac{a_0 \tau_k}{q N} \sqrt{1 + \frac{q N}{1,5 q \tau_k (1 + \gamma)}} = 0.0000$ $\alpha = C/0,4$ <input type="text" value="0.000"/> Calcola
2	QUALITÀ DEL S.R.	12	23	(vedi manuale) ³⁴	
3	RESISTENZA CONVENZIONALE	13	24	Numero di piani N ³⁵ <input type="text"/> Area totale coperta A_t (mq) ³⁷ <input type="text"/> Area A_x (mq) ⁴¹ <input type="text"/> Area A_y (mq) ⁴⁴ <input type="text"/> τ_x (t/mq) ⁴⁷ <input type="text"/> Alt. media interpiano h (m) ⁵⁰ <input type="text"/> Peso specifico pareti p_m (t/mc) ⁵² <input type="text"/> Carico permanente solai p_s (t/mq) ⁵⁴ <input type="text"/>	Parametro 6. Configurazione planimetrica $\beta_1 = a/l$ $\beta_2 = b/l$
4	POSIZIONE EDIFICIO E FONDAZIONE	14	25	Pendenza percentuale del terreno ⁵⁶ <input type="text"/> Roccia Fondazioni: Si <input type="text" value="1"/> No <input type="text" value="2"/> Terr. sciolto non sping Fond. Si <input type="text" value="3"/> No <input type="text" value="4"/> Terr. sciolto spingente Fond. Si <input type="text" value="5"/> No <input type="text" value="6"/> Differen. max di quota Δh (m) ⁵⁹ <input type="text"/>	
5	ORIZZONTAMENTI	15	26	Piani sfalsati Si <input type="text" value="1"/> No <input type="text" value="2"/> Orizzontamenti rigidi e ben collegati ⁶³ <input type="text" value="1"/> Orizzontam. deformabili e ben collegati <input type="text" value="2"/> Orizzontam. rigidi e mal collegati <input type="text" value="3"/> Orizzontam. deformabili e mal collegati <input type="text" value="4"/> % Orizzontam. rigidi e ben collegati ⁶⁴ <input type="text"/>	Parametro 7. Configurazione in elevazione
6	CONFIGURAZIONE PLANIMETRICA	16	27	Rapporto percentuale $\beta_1 = a/l$ ⁶⁶ <input type="text"/> Rapporto percentuale $\beta_2 = b/l$ ⁷⁰ <input type="text"/>	Parametro 9. Copertura
7	CONFIGURAZIONE IN ELEVAZIONE	17	28	% aumento (+) o diminuzione(-) di massa ⁷⁴ <input type="text"/> Rapporto percentuale T/H ⁷⁷ <input type="text"/> Percentuale superficie porticata ⁷⁹ <input type="text"/> Piano terra porticato Si <input type="text" value="1"/> No <input type="text" value="2"/>	Coperture spingenti (tipologia M) $l/h > 20$
8	D_{max} MURATURE	18	29	Rapporto massimo l/s ⁸² <input type="text"/>	Coperture poco spingenti (tipologia N) $l/h < 20$
9	COPERTURA	19	30	Copert. non sp. ⁸⁴ <input type="text" value="1"/> poco sp. <input type="text" value="2"/> sp. <input type="text" value="3"/> Cordoli in copertura Si ⁸⁵ <input type="text" value="1"/> No <input type="text" value="2"/> Catene in copertura Si ⁸⁶ <input type="text" value="1"/> No <input type="text" value="2"/> Carico perman. coper. p_c (t/mq) ⁸⁷ <input type="text"/> Lungh. appoggio coper. l_b (m) ⁹⁰ <input type="text"/> Perimetro copertura l (m) ⁹³ <input type="text"/>	Coperture non spingenti (tipologia O)
10	ELEM. NON STRUTT.	20	31	(Vedi manuale)	
11	STATO DI FATTO	21	32	(Vedi manuale)	Codice dell'edificio per la verifica AQ_01A Il Tecnico incaricato ING. TAL DE TALI

APPENDICE H

FICHE D'ÉVALUATION DES DOMMAGE

Code inspecteur :

FICHE D'ÉVALUATION DES
DOMMAGES (EL-ASNAM)

C.E.T.C.

IDENTIFICATION DE LA CONSTRUCTION

Secteur :	Zone :	Construction calculée au séisme : Oui - Non
Adresse ou éléments d'identification :		Construction contrôlée : Oui - Non

USAGE DE LA CONSTRUCTION

Logement	Scolaire	Commercial
Administratif	Hospitalier	Industriel
Socio-culturel	Sportif	Réservoir d'eau
Autres (à préciser) :		

DESCRIPTION SOMMAIRE

Age approximatif : Nombre de niveaux : Nombre de joints de dilatation - en élévation : - en infrastructure :	Vide sanitaire : Oui - Non Sous-sol : Oui - Non Éléments extérieurs indépendants (escaliers, auvent, passage couvert, ...)
--	--

PROBLEMES DE SOL AUTOUR DE LA CONSTRUCTION

Faille : Oui - Non	- Affaissement-soulèvement : Oui - Non	
Liquéfaction : Oui - Non	- Glissement : Oui - Non	

FONDATION - INFRASTRUCTURE

Fondations : - Type de fondation : - Type dommage : . tassement uniforme : Oui - Non . glissement : Oui - Non . basculement : Oui - Non	Infrastructure (dans le cas VS ou S/Sol) - Voile béton continu : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - Poteaux béton avec remplissage : 1 - 2 - 3 - 4 - 5
---	--

STRUCTURE RESISTANCE

<u>Éléments porteurs</u> (charge verticale) - murs en maçonnerie : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - voiles béton : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - poteaux béton : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - poteaux métalliques : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - poteaux bois : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - autres : 1 - 2 - 3 - 4 - 5	<u>Éléments de contreventement</u> - murs en maçonnerie : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - portique béton armé : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - portiques métalliques : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - palées triangulées : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - voiles béton : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - autres : 1 - 2 - 3 - 4 - 5
<u>Planchers - Toiture terrasse</u> - béton armé - solives métallique - solive bois	<u>Toiture inclinée</u> - charpente métallique : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - couverture métallique : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - couverture tuile : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - couverture amiante - ciment : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - charpente bois : 1 - 2 - 3 - 4 - 5

(*) : entourer la mention utile, dans la cas de n° : un ou plusieurs numéros peuvent être entourés

Eléments secondaires

<u>Escaliers</u>		<u>Remplissages extérieures</u>	
- béton	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5	- Maçonnerie	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
- métal	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5	- Béton préfabriqué	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
- bois	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5	- Bardages	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
		- Autres	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
<u>Autres éléments intérieures</u>		<u>Eléments extérieures</u>	
- Plafond		- Balcons	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
- Cloisons		- Garde - corps	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
- Éléments vitrés		- Auvents	: 1 - 2 - 3 - 4 - 5
- Acrotères - corniches		- 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 un soutenue par une autre construction	:	Oui - Non

VICTIMES

OUI - NON - PEUT - être - Si oui combien ?

COMMENTAIRE SUR LA NATURE ET LA CAUSE PROBABLE DES DOMMAGES

	Sens transversal	sens longitudinal
- Symétrie en plan	: Bon - Moyen - Mauvais	: Bon - Moyen - Mauvais
- Régularité en élévation	: Bon - Moyen - Mauvais	: Bon - Moyen - Mauvais
- Redondance des files	: Bon - Moyen - Mauvais	: Bon - Moyen - Mauvais

AUTRES COMMENTAIRES :

EVAUATION FINALE

<u>Niveau général des dommages</u>	<u>Couleur à utiliser</u>
1 - 2 - 3 - 4 - 5	VERT ORANGE ROUGE

MESURES IMMEDIATES A PRENDRE

Tableaux de classe des paramètres d'entrées et sorties pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armés d'après les fiches d'évaluation des dommages (C.E.C.T)

	FICHE N°1	FICHE N°2	FICHE N°3	FICHE N°4	FICHE N°5	FICHE N°6	FICHE N°7	FICHE N°8	FICHE N°9	FICHE N°10
usage de C	logement	scolaire	mosquée	scolaire	Socio culture	administratif	commercial	logement	logement	logement
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P4	3	1	1	5	5	5	3	2	2	4
P5	3	1	1	5	5	5	2	2	2	4
P6	2	1	1	3	5	4	1	2	2	2
P7	3	2	1	5	3	4	2	2	3	2
P8	1	1	1	1	1	5	1	1	5	1
P9	1	1	1	3	1	3	5	3	3	3
P10	1	1	1	3	1	3	5	3	3	3
SORTIE	3	2	1	5	5	5	4	2	3	3
COULER	orange	vert	vert	rouge	rouge	rouge	orange	orange	orange	orange

	FICHE N°11	FICHE N°12	FICHE N°13	FICHE N°14	FICHE N°15	FICHE N°16	FICHE N°17	FICHE N°18	FICHE N°19	FICHE N°20
usage de C	logement	administratif	logement	administratif	logement	logement	Socio culturel	scolaire	scolaire	scolaire
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
P3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
P4	1	1	1	1	2	1	5	5	4	2
P5	1	1	1	1	2	1	5	4	5	2
P6	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
P7	1	2	2	1	2	1	3	5	5	3
P8	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1
P9	3	1	5	3	3	1	1	1	3	1
P10	3	1	5	3	3	3	1	3	3	1
SORTIE	1	2	1	1	2	2	5	5	5	5
COULER	vert	vert	vert	vert	vert	vert	rouge	rouge	rouge	rouge

	FICHE N°21	FICHE N°22	FICHE N°23	FICHE N°24	FICHE N°25	FICHE N°26	FICHE N°27	FICHE N°28	FICHE N°29	FICHE N°30
usage de C	logement	logement	administratif	logement	logement	hospitalier	socio-culture	commercial	scolaire	logement
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	1
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
P4	5	3	5	1	4	4	4	5	1	5
P5	5	3	5	1	4	5	4	5	1	5
P6	5	2	4	1	2	4	2	1	1	5
P7	5	5	5	2	4	3	3	5	2	5
P8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P9	1	5	3	3	3	3	3	3	1	2
P10	1	3	5	3	3	3	3	3	1	2
SORTIE	5	4	5	2	4	5	4	5	2	5
COULER	rouge	rouge	rouge	vert	rouge	rouge	rouge	rouge	vert	rouge

	FICHE N°31	FICHE N°32	FICHE N°33	FICHE N°34	FICHE N°35	FICHE N°36	FICHE N°37	FICHE N°38	FICHE N°39	FICHE N°40
usage de C	logement	scolaire	logement	logement	logement	scolaire	logement	logement	logement	commercial
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P3	1	1	4	2	3	1	1	1	2	1
P4	2	1	2	2	2	3	3	4	3	1
P5	2	1	2	2	2	4	3	4	3	2
P6	3	1	3	2	2	1	3	2	2	2
P7	5	4	3	3	3	4	3	4	4	3
P8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P9	1	1	3	3	3	5	1	5	5	1
P10	1	1	3	3	3	5	1	5	3	1
SORTIE	3	4	3	3	3	4	3	4	3	3
COULER	orange									

	FICHE N°41	FICHE N°42	FICHE N°43	FICHE N°44	FICHE N°45	FICHE N°46	FICHE N°47	FICHE N°48	FICHE N°49	FICHE N°50
usage de C	commercial	hospitalier	scolaire	logement	scolaire	administratif	administratif	commercial	mosquée	logement
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1
P3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P4	3	2	4	4	2	1	2	2	3	1
P5	2	2	3	4	3	1	2	1	3	1
P6	2	5	2	1	1	4	1	1	1	1
P7	4	5	3	5	5	4	2	4	5	4
P8	5	1	5	1	1	1	1	1	1	1
P9	1	1	1	5	1	3	1	1	1	1
P10	1	1	3	1	1	3	1	1	3	1
SORTIE	4	4	4	4	3	3	2	3	4	2
COULER	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange

	FICHE N°51	FICHE N°52	FICHE N°53	FICHE N°54	FICHE N°55	FICHE N°56	FICHE N°57	FICHE N°58	FICHE N°59	FICHE N°60
usage de C	logement	logement	administratif	garage	administratif	logement	administratif	administratif	logement	logement
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P4	2	4	2	4	1	4	4	2	1	2
P5	2	4	2	4	1	3	4	2	1	2
P6	3	2	1	2	1	4	2	2	1	2
P7	3	3	4	5	3	5	5	2	1	1
P8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P9	5	1	5	5	1	3	3	1	3	1
P10	3	1	5	1	3	5	3	1	3	1
SORTIE	3	4	3	4	3	4	4	2	1	2
COULER	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	orange	vert	orange vert

	FICHE N°121	FICHE N°122	FICHE N°123	FICHE N°124	FICHE N°125	FICHE N°126	FICHE N°127	FICHE N°128	FICHE N°129	FICHE N°130
usage de C	scolaire	industriel	logement	logement	logement	logement	logement	logement	poste	logement
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P4	3	3	1	2	1	1	2	1	2	3
P5	3	3	1	1	2	1	3	1	2	2
P6	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2
P7	3	5	2	2	2	2	3	3	4	4
P8	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1
P9	1	1	1	1	5	1	3	5	1	3
P10	1	1	1	1	3	1	1	3	1	3
SORTIE	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3
COULER	orange	orange	vert	vert	vert	vert	orange	orange	orange	orange

APPENDICE I

ARTICLE 1



Prédiction de la vulnérabilité des constructions par un système de réseaux de neurones

Hichem Noura* — Mohamed Abed* — Hafida Bouarfa**

* Université de Blida, Département de Génie Civil

BP 270 Blida 9000 Algérie

Email : hichem.noura@hotmail.fr, abedmed@yahoo.fr

** Université de Blida, Département d'informatique

BP 270 Blida 9000 Algérie

Email : hafidabouarfa@hotmail.com

RÉSUMÉ. L'Algérie du nord est confronté à une activité sismique récurrente assez forte. Pouvoir estimer la vulnérabilité du bâti existant, plus particulièrement l'ancien est aujourd'hui un des défis auquel sont confrontés les pouvoirs publics. Les résultats de telles études sont importants dans la réduction de pertes humaine et matérielle pour des séismes futurs tout en permettant des actions de renforcement de structures existantes et une meilleure gestion de la crise post-sismique. Dans ce contexte, le travail que nous présentons expose une approche utilisant les Réseaux de Neurones (RNs) comme outil pour évaluer la vulnérabilité de structures en béton armé. Un système de RNs associé à un ensemble de 130 constructions expertisées est mis en place pour constituer d'abord une phase d'apprentissage. Dans une seconde phase dite de simulation, un autre ensemble de constructions est utilisé pour prédire la vulnérabilité. Une étude de validation a permis de qualifier de satisfaisants les résultats estimés par le système de RNs par rapport à ceux figurants dans les fiches d'expertise réelles.

ABSTRACT. North Algeria is subjected to a frequent strong seismic activity. The estimation of the vulnerability of constructions, especially the ancient ones constitute a challenge for the public authorities. The results of such studies are important in the reduce of material and human losses under future seismic events as they allow strengthening intervention and also to improve the disaster management plans. In this context, we expose in this paper an approach based on neural networks to assess the vulnerability of concrete structures. First, a neural network associated with a set of 130 constructions with expert opinion, is utilised to constitute a learning phase. In a second period, another set of buildings is utilised to measure the vulnerability and compare it with the expert assessment. A validation study permits to conclude adequate the results estimated with the neural network system.

MOTS-CLÉS : Vulnérabilité du bâti, Expertise, Réseaux de neurones, Endommagement

KEYWORDS: Building vulnerability, Expertise, Neural networks, Damage

1. Introduction

Une partie assez importante du bâti de l'Algérie du nord date de l'époque coloniale française et turc. Ces constructions sont toujours exploitées, certaines d'entre elles ont subi des actions de renforcement et confortement vu leur importance (hôpitaux par exemple). Paradoxalement, cette bande nord de l'Algérie se trouve confrontée à une activité sismique récurrente assez forte. Prédire les conséquences post-sismiques pour ces constructions qui n'obéissent pas au code parasismique actuel nécessite la détermination et la maîtrise parfaite des paramètres affectant leur vulnérabilité au séisme. L'aptitude à pouvoir mesurer le plus fidèlement cette vulnérabilité est aujourd'hui un des défis les plus cruciaux auquel sont confrontés les ingénieurs de structure. Dans ce contexte, les résultats de telles études sont importants dans la réduction de pertes humaine et matérielle tout en permettant des actions de renforcement de structures existantes et une meilleure gestion de la crise post-sismique.

L'estimation de dommages causés par un séisme futur dépend de plusieurs facteurs. En effet, la quantité des ouvrages, la variabilité des types de construction et le manque d'informations disponibles pour décrire les ouvrages constituent les principales difficultés rencontrées. La plupart des méthodes disponibles d'estimation de la vulnérabilité ont été établies sur la base d'observations post-sismiques, recensant le niveau de dommage observé en fonction de la nature de la construction. Ces méthodes sont établies pour des pays à forte sismicité (USA, Japon, Turquie, Italie,...). Elles sont fondées sur l'observation des caractéristiques structurales des bâtiments en vue d'attribuer un indice de vulnérabilité global (IV). Selon les informations disponibles, différents niveaux de précision sont prévus, ce qui conduit à une variabilité de la qualité de l'estimation de la vulnérabilité. Ces méthodes proposent une relation reliant l'indice de vulnérabilité à une échelle de dommage pour un mouvement sismique donné, un scénario probable ou un séisme historique, par exemple.

Les paramètres pertinents, les coefficients qui leurs sont attribués dans le calcul de l'indice de vulnérabilité (IV) et le lien entre IV et le dommage sont déterminés à partir du retour d'expérience réalisé par des experts lors de missions post-sismiques. Malheureusement, dans certaines situations le mouvement du sol qui a généré les dégâts observés n'est généralement pas connu car il n'a pas été enregistré.

Différentes méthodologies sont proposées pour mesurer la vulnérabilité structurelle sismique (méthode de l'index par exemple). Ces techniques sont manifestement d'une nature empirique puisqu'elles sont basées sur des expertises d'ingénieurs et des inspections visuelles. Parmi ces méthodes, nous pouvons mentionner la méthode italienne GNDT de Benedetti (index de vulnérabilité), le programme HAZUS 99 et le FEMA 273-274.

Le développement de systèmes d'aide à la décision pour assister les ingénieurs dans l'estimation de la vulnérabilité peut être une expérience favorable. L'informatique est devenue omniprésente dans l'étude et la prise en compte des risques naturels. De nombreuses expériences ont démontré les bénéfices liés à l'utilisation de l'informatique pour répondre à différents besoins tels que la gestion, la modélisation, l'inférence, le calcul numérique et la prévision des phénomènes. Dans le présent article, nous présentons une approche basé sur un système de Réseaux de Neurones (RNs) pour apprécier la vulnérabilité d'une construction. En effet, un système de RNs associé à un ensemble de constructions expertisées peut être mis en place pour constituer d'abord une phase d'apprentissage. Dans une seconde phase, ce système peut être utilisé pour prédire la vulnérabilité d'un autre ensemble de constructions.

2. Principe de l'approche proposée :

La vulnérabilité caractérise la fragilité d'un élément exposé au phénomène naturel. On l'exprime par une relation entre des niveaux de dommages et des niveaux d'agression sismique. On peut distinguer une vulnérabilité physique (ou structurelle), humaine, fonctionnelle, économique, sociale, ... On assimile le plus

souvent la vulnérabilité à la résistance ou à l'endommagement d'un type d'enjeux (population, bâtiments...) par rapport à la manifestation d'un phénomène naturel d'une intensité donnée.

Une construction est composée d'une ossature porteuse (la structure), et d'équipements secondaires permettant d'en assurer les fonctions principales (couverture, fermeture, séparations, circulations, matériels techniques divers...). Ainsi la structure reliée au sol par les fondations doit assurer la stabilité sous l'effet de la gravité (les masses résultant de l'ensemble des équipements sont supportées par la structure), les effets associés au climat (vent, neige, variations de température) et en zone sismique les tremblements de terre.

L'analyse de la vulnérabilité sismique du bâti nécessite la détermination de paramètres caractérisant le comportement dynamique des structures. Dans les méthodes existantes, ces informations sont collectées par expertise visuelle ou choisies parmi des valeurs forfaitaires. D'autres méthodes se basent sur la mesure des paramètres dynamiques modaux (Michel et al., *Earthquake engineering and Structure*, 2011). L'approche choisie pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé consiste à identifier des paramètres structuraux ou non structuraux ayant une influence sur la réponse sismique de la structure. Une partie de ces paramètres est extraite à partir de fiches d'évaluations des dommages pour différentes régions en Algérie.

2.1. Les paramètres choisis et leurs classifications

Les paramètres d'estimation de la vulnérabilité des constructions, sont choisis à partir des fiches d'évaluation des dommages des constructions en béton armé de différentes régions en Algérie. Ces paramètres sont classés à partir des méthodes d'analyse de la vulnérabilité, développées dans des pays à forte sismicité.

Chaque paramètre de nature structural ou non structural considéré peut avoir une influence sur la réponse sismique de la construction et ne peut prendre qu'une seule vulnérabilité, celle-ci représente la classe à laquelle appartient cette construction.

N°	Paramètres	Classes				
1	Problème de sol autour de la construction	(Non) 1			(Oui) 5	
2	Fondations	(Non) 1			(Oui) 5	
3	Infrastructure	1	2	3	4	5
4	Éléments porteurs (charges verticales)	1	2	3	4	5
5	Éléments de contreventement	1	2	3	4	5
6	Planchers-toiture	1	2	3	4	5
7	Élément non structuraux (secondaires)	1	2	3	4	5
8	Influence des constructions adjacentes	(Non) 1			(Oui) 5	
9	Symétrie en plan	(Bon) 1	(Moyen) 3		(Mauvais) 5	
10	Régularité en élévation	(Bon) 1	(Moyen) 3		(Mauvais) 5	

Tableau 1. Classe de vulnérabilité des différents critères structuraux.

En nous basant sur la méthode GNDT (Benedetti et Petrini 1984, GNDT 1994), et l'échelle européenne EMS98, nous proposons le tableau 1 fixant les différents paramètres pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé.

Pour chaque paramètre, nous avons attribué une valeur comprise entre 1 et 5. La moins vulnérable (1) traduit la conformité de ce paramètre vis-à-vis de l'intégrité de la structure, la plus vulnérable (5) traduit la situation la plus défavorable tandis que les classes 2, 3 et 4 représentent des situations intermédiaires.

2.2. Classification de la structure

La classification d'une structure selon sa résistance au séisme se présente comme suit :

- Classe 1 : une très bonne résistance au séisme (Dommages modérés)
- Classe 2 : une bonne résistance au séisme (Dommages modérés)
- Classe 3 : une moyenne résistance au séisme (Dommages importants à lourds)
- Classe 4 : une mauvaise résistance au séisme (Très lourds dommages)
- Classe 5 : une très mauvaise résistance au séisme (Destruction)

classe	1	2	3	4	5
Couleur à utilisé					

Figure 1. Classifications des constructions selon les fiches d'évaluation des dommages.

3. Les réseaux de neurones Artificiels (RNAs)

Les RNAs sont inspirés de la biologie et représentent un modèle mathématique du fonctionnement du neurone biologique (Jodouin, 1994). L'idée est de présenter au RNAs des données d'entrée et de sortie, et de lui faire apprendre la relation entre les deux par un processus appelé apprentissage. Ce dernier consiste à minimiser l'erreur par ajustement des paramètres du modèle.

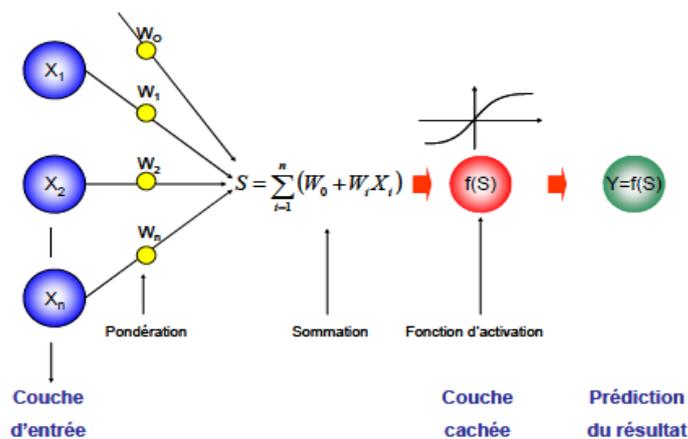


Figure 2. Architecture du réseau RPG

Les RNAs offrent une alternative pour la modélisation mathématique et font partie des modèles statistiques non paramétriques et non linéaires aptes à répondre aux problématiques d'aide à la décision, de diagnostic, de

prédiction, etc. L'application de ce type de modèle n'est apparue qu'au début des années 1990 et leur avantage réside dans leur capacité de généralisation.

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) sont très utilisés dans le domaine génie civil. Le grand intérêt porté aux réseaux de neurones provient de leurs capacités d'apprendre, ce qui leur confère la possibilité d'approximer n'importe quelle fonction avec une précision souhaitée. Néanmoins, les résultats prédits par ce type d'outils dépendent du nombre de cas présentés en phase apprentissage. En effet, plus ce nombre est élevé, plus la précision est meilleure. Les RNAs sont utilisés dans plusieurs domaines d'application telles que la reconnaissance de formes, le traitement du signal, l'apprentissage, la mémorisation et surtout la généralisation.

L'architecture du réseau multicouche à rétropropagation (RPG) utilisé dans cette étude est constituée d'une couche de neurones d'entrée, d'une ou plusieurs couches cachées de neurones, d'une couche de sortie, et un ensemble de paramètres qui commandent le processus d'apprentissage tel que le paramètre d'apprentissage (η), et l'erreur quadratique maximale permise (E^2). La figure 2 montre l'architecture du réseau de RPG. Les différentes étapes à suivre lors de l'apprentissage d'un réseau de neurones à propagation avant avec l'algorithme « Back propagation » se présentent comme suit :

1er étape : Initialiser les poids des liens entre les neurones. Souvent une valeur comprise entre 0 et 1, fixée aléatoirement, est assignée à chacun des poids.

2e étape : Application d'un vecteur entrées-sorties à apprendre.

3e étape : Calcul des sorties du RNAs à partir des entrées qui lui sont appliquées et calcul de l'erreur entre ces sorties et les sorties idéales à apprendre.

4e étape : Correction des poids des liens entre les neurones de la couche de sortie et de la première couche cachée selon l'erreur présentée en sortie.

5e étape : Propagation de l'erreur sur la couche précédente et correction des poids des liens entre les neurones de la couche cachée et ceux en entrée.

6e étape : Boucler à la 2e étape avec un nouveau vecteur d'entrées-sorties tant que les performances du RNA (erreur sur les sorties) ne sont pas satisfaisantes.

L'algorithme de rétro propagation du gradient consiste à effectuer une descente de gradient sur la fonction de coût déjà utilisée pour le neurone seul:

$$\varepsilon(\vec{w}, k) = \frac{1}{2} (d(k) - y(k))^2 \quad [\text{Eq. 1}]$$

4. Application du RN (RPG) pour l'estimation de la vulnérabilité

Pour le cas que nous traitons, une base de 130 cas de constructions expertisées est utilisée dans une architecture de RN pour constituer la phase d'apprentissage par le logiciel MATLAB 7.8 (DATA/NETWORK MANAGER). Ces cas sont choisis parmi des fiches d'évaluation de dommages post-sismiques pour des séismes importants ayant affecté l'Algérie (Chlef ex El Asnam 1980, Boumerdès 2003) Nous avons volontairement diversifié les types de constructions (maçonnerie, béton armé avec/sans voiles, date de construction, etc.) et les sites d'implantation afin de pouvoir contenir tous les cas possibles lors de la phase apprentissage

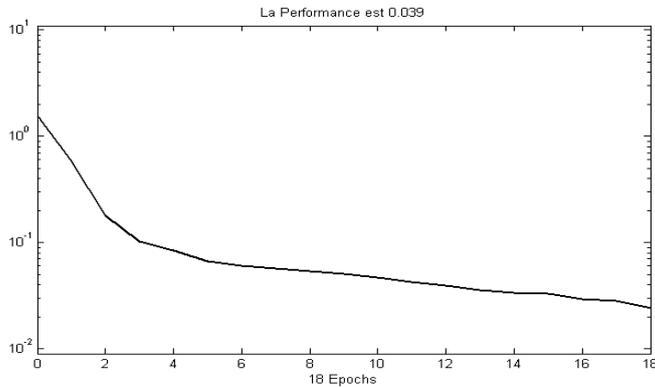
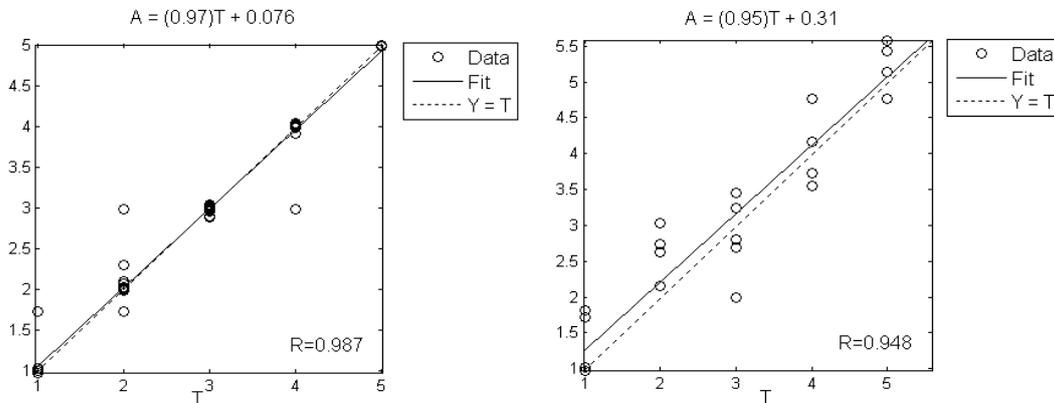


Figure 3. Evaluation de l'erreur par le RPG

4.1. Performance des résultats

La courbe d'apprentissage indique que l'exécution du réseau converge plus rapidement pendant les premières itérations et atteint une limite d'erreur de l'ordre de 0.039. Les résultats d'apprentissage et de test du réseau RPG



sont montrés sur la figure 4 cette figure montre significativement l'amélioration des résultats d'apprentissage et de test, pour toutes les valeurs des paramètres d'estimation de la vulnérabilité de validation.

Figure 4. Comparaison de la sortie donnée par le RN (RPG) et la sortie ciblée.

Pour vérifier la qualité du réseau qui forme une régression linéaire entre la réponse du réseau et la sortie désirée un taux de corrélation (R évalué) est calculé entre la réponse du réseau et la sortie calculée. Une ligne du mieux allés de toutes les paires de la sortie désirée du réseau (A) et la sortie calculée (T) est présentée dans la figure 4. Pour un parfait réseau formé, il faut que tous les points des données soient alignés le long de la diagonale (A=T) et la valeur de R sera égale à un (R=1).

Les résultats d'apprentissage et de test du réseau d'estimation de la vulnérabilité des constructions est données sur la figure 4. Cette figure montre significativement l'amélioration des résultats de test, pour toutes les valeurs des paramètres d'estimation de la vulnérabilité de validation.

4.2. Validation du RN RPG

Pour juger la fiabilité des résultats proposés par le système, nous avons procédé à une étude de validation. En effet, une autre base constituant 10 constructions expertisées qui ne faisaient pas partie de l'ensemble des « données apprentissage » est utilisée pour comparer les résultats prédits par le système de RN avec ceux des expertises (résultats cibles) voir Tableau 2. Il est à noter que ces constructions sont choisies parmi les fiches d'évaluation des dommages post-sismiques des séismes d'El Asnam et de Boumerdès.

Cette procédure de validation est effectuée dans l'outil Network/Data Manager du logiciel MATLAB. Après importation les données enregistrées dans l'espace de travail (Workspace) du réseau de neurones (RPG) choisi, nous devons saisir les paramètres d'estimation de la vulnérabilité d'une construction (Input validation) qui représentent les paramètres d'entrées du réseau de neurones.

usage de C	F N° 131	F N° 132	F N° 133	F N° 134	F N° 135	F N° 136	F N° 137	F N° 138	F N° 139	F N° 140	F N° 141
P1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P3	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
P4	5	2	1	1	3	4	2	1	1	1	1
P5	5	2	1	1	4	4	2	1	1	1	1
P6	3	2	1	1	3	3	2	1	1	1	1
P7	5	2	2	2	5	5	2	2	2	1	1
P8	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1
P9	3	1	3	1	3	3	1	3	1	3	3
P10	3	1	3	1	1	1	3	3	1	3	3
Couleur											
Sortie réelle	5	2	2	2	4	4	3	3	2	1	1

Tableau 2. Paramètres d'estimation de la vulnérabilité et la sortie réelle des constructions.

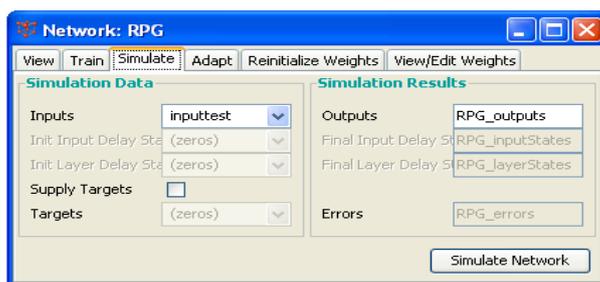


Figure 5. Panneau de simulation

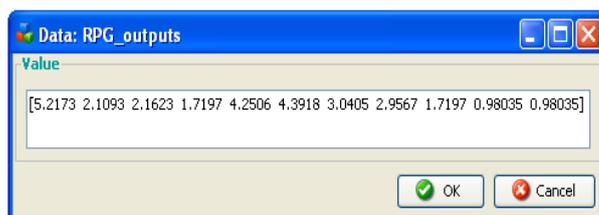


Figure 6. Fenêtre de visualisation de la sortie calculée par le RN (RPG)

Les résultats obtenus sont regroupés dans la fenêtre Network/Data Manager, nous pouvons voir une nouvelle variable dans le menu (cf. figure 6) qui représente la sortie calculée par le réseau de neurone (RPG_outputs).

Cette dernière correspond au taux d'endommagement ou l'indice de vulnérabilité d'une construction.

Nous comparons les deux sorties, sortie calculée par le réseau de neurone et la sortie réelle, on remarque que les résultats calculés par le réseau de neurone (RPG) donne une prévision satisfaisante. On peut donc construire des modèles de réseaux de neurones qui fournissent un moyen rapide, pratique et très bénéfique pour l'estimation de la vulnérabilité des constructions.

	FN° 131	FN° 132	FN° 133	FN° 134	FN° 135	FN° 136	FN° 137	FN° 138	FN° 139	FN° 140	FN° 141
Sortie réelle	5	2	2	2	4	4	3	3	2	1	1
Couleur											
Sortie par RPG	5.21	2.10	2.16	1.71	4.25	4.39	3.04	2.95	1.71	0.98	0.98

Tableau 3 : Comparaison de la sortie réelle et la sortie calculée par le RN (RPG).

5. Conclusion

La technique des réseaux de neurones artificiels appliquée dans cette étude a été fait à l'aide de l'application NETWORK/ DATA MANAGER du logiciel MATLAB 7.8. Le réseau de neurone RPG choisi a donné des résultats satisfaisants. L'erreur moyenne de l'estimation de la vulnérabilité des constructions en béton armé était de 5% avec un coefficient de régression (R) de 0.98. Ces résultats confirment que pour la démarche adoptée une évaluation rapide et peu couteuse de la vulnérabilité peut être menée. Pour pouvoir être étendue à d'autres sites, la connaissance de l'aléa sismique est requise. Pour cela à notre sens, deux démarches sont envisageables: la première consiste à procéder de la même manière, c'est-à-dire inclure des jeux de données d'apprentissage pour les nouvelles zones; une seconde démarche consisterait à mesurer l'impact de l'aléa sismique de la nouvelle zone et ajuster les résultats prédits en conséquence.

Les réseaux de neurones ont besoin d'un nombre important de données pour être entraîné adéquatement et pour atteindre une convergence statistique satisfaisante. Toutefois, dans la présente étude, le nombre de données disponibles était malheureusement limité. Ceci nous limite quelque peu par conséquent dans nos conclusions. Néanmoins, les résultats obtenus indiquent que les réseaux de neurones peuvent constituer une alternative intéressante dans la confection d'un outil d'assistance en vue de l'estimation de la vulnérabilité des constructions. Certainement, des investigations supplémentaires par une augmentation et une diversification du type de constructions dans la phase apprentissage conforteront cette dernière conclusion.

Remerciements : nous tenons à remercier les responsables du CGS (Centre du Génie Parasismique) d'Alger pour leur assistance technique et la mise à notre disposition des données nécessaires à la présente étude.

6. Bibliographie

F.M. Mazzolani, B. Faggiano, A. Formisano G. Florio, D. De Gregorio Southampton, *Seismic Vulnerability of two schools in Torre del Greco (NA) by means of the GNDT forms*, University of Naples "Federico II", Italy, March 27-28, 2009.

ATC, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC 40, Applied Technology Council, Redwood City, California, Etats- Unis, 1996.

- H. Bouarfa, M. Abed et F. Boulaghmen, *Aide au diagnostic post-sismique des constructions par raisonnement basé sur des cas*, 7ème colloque national de l'AFPS, Ecole Centrale de Paris, 04-06 Juillet 2007.
- AFPS, *Vulnérabilité aux séismes du bâti existant*, Association française du génie parasismique, Paris, France, 2000.
- FEMA, *Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS 99*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, Etats-Unis, 1999.
- D.Bertil, M. B.Valérius, J. Péricat, S. Auclair *Scénarios Départementaux de Risque Sismique en Guadeloupe*. Rapport BRGM/RP-57488-FR, 88 p, 2009.
- P.Guéguen, *Vulnérabilités publiques de l'agglomération grenobloise*, Laboratoire de Géophysique et Tectonophysique, Rapport, Grenoble, France, 2006.
- Européen Macroseismic Scale, L'Échelle Macroseismique Européenne EMS98, A.Levet, Luxembourg, Vol 19, 2001.
- M.Boukri, M.Bensaïbi, *Indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger*, 7ème Colloque National AFPS, 2007.
- D.Philippe Guéguen, *évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle application à Grenoble*, Rapport, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2007.
- Règles parasismiques Algériennes RPA99 modifiées en 2003, Algérie, 2003.
- G.Grünthal, , R. M. W.Musson, , J. Schwarz, M.Stucchi, *European Macroseismic Scale (EMS-98)*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, Vol 15, (1998).
- MATLAB User's Guide, version 7.8, Math Works, Inc, U.S.Patents.2009.
- F.Rosenblatt, *The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organisation in the brain*, Psychological Review, vol. 65, pp.386-408, 1958.
- Windrow B.and Lehr M.A, *30years of adaptive neural networks Perceptron, Madaline, and back propagation*, Proceeding of IEEE,vol. 78, pp.1415-1442, 1991.
- D.E. Rumelhart, J. McClelland, editors, *Parallel Data Processing*, The M.I.T. Press, Cambridge, MA, Vol.1, Chapter 8, pp. 318-362, 1986.
- A.N. Michel, W. Porod, *Analysis and synthesis of a class of neural networks: linear systems operating on a closed hypercube*, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 36, pp. 1405-1422, No. 11, November 1989.
- D.Hebb, *The Organisation of Behaviour*, New York: Wiley, 1949.
- B.Widrow, S.D.Sterns, *Adaptive Signal Processing*, New York, Prentice-Hall, 1985.
- M.T.Hagan, H.B. Demuth, M.H. Beale, *Neural Network Design*, Boston, MA: PWS Publishing, 1996.
- G.E.P.Box, W.G.Hunter, J.S.Hunter, *Statistics for Experimenters*, Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 1978.

RÉFÉRENCES

1. M.J. Nollet, *Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants*, Département de Génie de la Construction École de Technologie Supérieure, Rapport Technique, Québec, Canada, 2004.
2. F.M. Mazzolani, B. Faggiano, A. Formisano G. Florio, D. De Gregorio Southampton, *Seismic Vulnerability of two schools in Torre del Greco (NA) by means of the GNDT forms*, University of Naples “Federico II”, Italy, March 27-28, 2009.
3. P. Guéguen, *Vulnérabilités publiques de l’agglomération grenobloise*, Laboratoire de Géophysique et Tectonophysique, Rapport, Grenoble, France, 2006.
4. Européen Macroseismic Scale, L’Échelle Macrosismique Européenne EMS98, A.Levert, Luxembourg, Vol 19, 2001.
5. MATLAB User’s Guide, version 7.8, Math Works, Inc, U.S.Patents.2009.
6. G. Jean-François, *Élaboration d’une méthode d’évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments*, Rapport, INSA Strasbourg, 2007.
7. BSSC, *the Seismic Evaluation of Existing Buildings, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (FEMA 178)*, NEHRP Handbook, Washington, D.C, Etats-Unis, 1992.
8. ATC, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC 40, Applied Technology Council, Redwood City, California, Etats- Unis, 1996.
9. AFPS, *Vulnérabilité aux séismes du bâti existant*, Association française du génie parasismique, Paris, France, 2000.
10. G. Grünthal, R.M.W. Musson, J. Schwarz, M. Stucchi, *European Macroseismic Scale (EMS-98)*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, Vol 15, (1998).
11. FEMA, *Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS 99*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, Etats-Unis, 1999.

12. D.Bertil, M.B. Valéarius, J. Péricat, S.Auclair *Scénarios Départementaux de Risque Sismique en Guadeloupe*. Rapport BRGM/RP-57488-FR, 88 p, 2009.
13. M. Boukri, M. Bensaïbi, *Indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie de la ville d'Alger*, 7ème Colloque National AFPS, 2007.
14. F.I. Benoud, M.Bensaïbi, *Détermination de l'Indice de Vulnérabilité pour les Bâtiments en Béton Armé*, Thèse de magistère, université Saad Dahleb de Blida, Algérie, 2006.
15. D.Philippe Guéguen, *évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle application à Grenoble*, Rapport, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2007.
16. Règles parasismiques Algériennes RPA99 modifiées en 2003, Algérie, 2003.
17. G.F.Luger, W.A. Stubblefield, *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, Addison-wesley, 1999.
18. H. Bersini, *Méthodes numériques d'intelligence artificielle*, Université libre de Bruxelles, Belgique, 2005.
19. L. Baghli, *Contribution à la commande de la machine asynchrone : utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques*, Thèse de doctoret, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 1999.
20. D.E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
21. R. Forsyth, *Expert Systems: Principles and Case Studies*, Chapman and Hall, 1984.
22. B. Kröse, P. van der Smagt, *An introduction to neural network*, ebook of The University of Amsterdam, November 1996.
23. F. Rosenblatt, *Principles of Neurodynamics*, Washington D.C., Spartan Press, 1961.
24. J.J. Hopfield, *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities*, Proceedings of National Academy of Science, vol. 79, pp.2554-2558, 1982.
25. F. Rosenblatt, *The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organisation in the brain*, Psychological Review, vol. 65, pp.386-408, 1958.
26. Windrow B.and lehr M.A, *30years of adaptive neural networks Perceptron, Madaline, and back propagation*, Proceeding of IEEE, vol. 78, pp.1415-1442, 1991.
27. J-F. Jodouin, *Les réseaux de neurones; principes et définition*, Hermes, 124p, 1994.
28. DARPA, *Neural Network Study*, AFCEA International Press, 1988.

29. S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, NY: Macmillan, p.2, 1994.
30. A. Nigrin, *Neural Networks for Pattern Recognition*, Cambridge, MA: The MIT Press, 1993.
31. J.M. Zurada, *Introduction To Artificial Neural Systems*, Boston: PWS Publishing Company, 1992.
32. D.E. Rumelhart, J.Mc Clelland, editors, *Parallel Data Processing*, The M.I.T. Press, Cambridge, MA, Vol.1, Chapter 8, pp. 318-362, 1986.
33. A.N. Michel, W. Porod, *Analysis and synthesis of a class of neural networks: linear systems operating on a closed hypercube*, *IEEE Transactions on Circuits and Systems* Vol. 36, pp. 1405-1422, No. 11, November 1989.
34. F. Moutarde, *Introduction aux réseaux de neurones*, Centre de Robotique (CAOR), Ecole des Mines de Paris, France, 2008.
35. T. Kohonen, *Self-Organization and Associative Memory*, 2nd Edition, Berlin: Springer-Verlag, 1987.
36. R. JEAN, *Neuron-Fuzzy Mode Ling: Architecture, Analysis and Application*, PhD Thesis, University of California, Berkley 1998.
37. H.R. Bherenji, P. Khedkar, *Learning and Tuning Fuzzy Logic controllers Through Reinforcements*, *IEEE Transactions on Neural Network*, vol. 3, pp.724-740, 1996.
38. D. Hebb, *The Organisation of Behaviour*, New York: Wiley, 1949.
39. B.Widrow, S.D. Sterns, *Adaptive Signal Processing*, New York, Prentice-Hall, 1985.
40. M.T. Hagan, H.B. Demuth, M.H. Beale, *Neural Network Design*, Boston, MA: PWS Publishing, 1996.
41. G.E.P. Box, W.G. Hunter, J.S. Hunter, *Statistics for Experimenters*, Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 1978.