

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira



Faculté des Sciences et des sciences appliquées

Département de Génie Civil

**Mémoire de fin d'études**

Présenté par :

**BOUGUEDAD Tarek Amine**

**MOKDAD Lydia**

En vue de l'obtention du Diplôme de Master 2 en :

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : structures**

**Thème :**

**Développement d'un indice de performance sismique pour les bâtiments d'habitation en  
Algérie - Application à la ville de Bouira**

**Devant le jury composé de :**

Mr. AOUARI Issam

Dr. MOUSSAOUI Fahem

Mr. LAIB.A

MAA

MCB

MAA

UAMOB

UAMOB

UAMOB

Président

Encadreur

Examineur

**Année Universitaire 2020/2021**

## ***Remerciement***

Avant tout, nous tenons à remercier notre Dieu le tout puissant, pour nous avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce travail.

Nous exprimons toute notre gratitude et nos remerciements, particulièrement à notre promoteur Dr Moussaoui Fahem le maître incontesté, par son talent extraordinaire a pu sans aucune difficulté, nous enseigner le génie civil ainsi pour son soutien, sa disponibilité, son amitié et son accueil chaleureux au cours de notre formation.

Notre gratitude aux membres de jury qui nous font l'honneur de juger et examiner notre travail de fin d'étude.

Nous tenons a remercier aussi notre chef département et l'ensemble des enseignants qui ont contribués a notre formation et a tout personnes ayant pris part dans la réalisation de ce modeste travail

Et enfin un grand hommage à nos parents et nos frères qui nous ont encouragé à suivre nos études.

***Amine & Lydia***

## Dédicace

A peine je viens de terminer la rédaction du mon mémoire de fin de deuxième cycle de graduation de Master, je voudrais très vite le dédier avec une immense joie, un grand honneur et un cœur chaleureux :

A mes très chers parents en signe de mes profondes et affectueuses reconnaissances pour les amours sans mesure, tous les sacrifices, les soutiens, les tolérances et les encouragements qu'ils ont bien voulu consentir pour moi. Tous les mots restent faibles pour leur exprimer mes sentiments et qu'ils acceptent seulement ces lignes en guise de témoignage

A mon binôme qui a été mon bras droit dans tout pas avancé vers le succès, fier de dire que c'est NOTRE TRAVAIL

A tous mes ami(e)s et connaissances

En fin à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci

*Tarek Amine BOUGUEDAD*

## Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mon père et ma mère pour leur amour inestimable, leurs sacrifices, leur confiance, leur soutien et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement durant toute ma recherche.

Sans oublier mon binôme « Amine Bouguedad » pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout long de ce travail.

Ainsi qu'un petit hommage à mon cher oncle KERBOUA Toufik qui m'a soutenu et encouragé durant tout mon cursus que dieu l'accueille dans son vaste paradis

Enfin, A tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à l'aboutissement de ce travail. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien, Merci d'être toujours là pour moi.

***Lydia MOKDAD***

# Table de matière

Remerciement .....	i
Dédicace .....	ii
Table de matière .....	iv
Liste de figures.....	ix
Liste des tableaux .....	xii
Liste des abréviations .....	xv
Résumé.....	xviii
Abstract.....	xix
ملخص .....	xx
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Étude bibliographique

I.1	Introduction .....	4
I.2	Définitions et terminologies .....	4
I.2.1.	Magnitude sismique .....	4
I.2.2.	Intensité sismique .....	5
I.2.3.	Aléa sismique .....	5
I.2.4.	Risque sismique .....	5
I.2.5.	Vulnérabilité sismique .....	6
I.3	Évaluation sismique .....	6
I.4	Méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique .....	7
I.4.1.	Les méthodes empiriques .....	8
I.4.1.1.	La méthode FEMA 154 .....	8
I.4.1.2.	La méthode EMS-98 .....	11
I.4.1.3.	La méthode VULNERALP .....	13
I.4.1.4.	La méthode de RISK-UE .....	14
I.4.1.5.	La méthode italienne (GNDT 1986) .....	17
I.4.1.6.	La méthode Japonaise .....	19
I.4.1.7.	La méthode Grille Suisse .....	20
I.4.1.8.	La méthode Néo-Zélandaise .....	21
I.4.1.9.	La méthode HAZUS .....	22
I.4.2.	Les méthodes mécaniques .....	24

I.4.2.1.	Courbes de capacité.....	24
I.4.2.2.	Courbes de fragilité.....	26
I.4.3.	La méthode de push-over.....	27
I.4.4.	La méthode CTC.....	28
I.5	Synthèse.....	28
I.6	Introduction.....	30
I.7	Analyses multicritères.....	30
I.7.1.	Difficulté d'un problème multicritère.....	31
I.7.2.	Nature des problèmes multicritères.....	31
I.7.3.	Le critère.....	32
I.8	Les méthodes multicritères d'aide à la décision (MADM).....	32
I.8.1.	Simple additive weighting (SAW).....	34
I.8.2.	Complex proportional assessment (COPRAS).....	34
I.8.3.	Goal programming (GP).....	35
I.8.4.	Compromise programming (CP).....	36
I.8.5.	Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS).....	36
I.8.6.	Multicriteria optimization and compromise solution (VIKOR).....	37
I.8.7.	Data envelopment analysis (DEA).....	37
I.8.8.	Analytic hierarchy process (AHP).....	38
I.8.9.	Analytic network process (ANP).....	39
I.8.10.	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH).....	40
I.8.11.	Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE).....	41
I.8.12.	Elimination and choice expressing reality (ELECTRE).....	43
I.8.13.	Multi-attribute utility theory (MAUT).....	44
I.8.14.	Multi-attribute value theory (MAVT).....	45
I.8.15.	Méthode d'évaluation spatio-temporelle (MOVISS).....	46
I.8.16.	Analyse multicritère spatial (SEVI) et Indice de vulnérabilité sociale (SoVI).....	47
I.8.17.	Modèle artificielle de réseau neuronal (ANN) pour les séismes.....	47
I.9	Synthèse.....	48
I.10	Conclusion.....	50

## **Chapitre II : Parc résidentiel algérien et performance sismique – État des lieux**

II.1.	Introduction .....	52
II.2.	Le parc résidentiel en Algérie en chiffres .....	52
II.2.1.	Programme quinquennal lancé durant la période 2015 – 2019 .....	54
II.2.2.	Programme quinquennal livré durant la période 2015 – 2019 .....	55
II.2.3.	Synthèse du bilan de réalisation des activités pour l’année 2020 .....	56
II.2.4.	Programme de logements 2020-2024 .....	57
II.3.	Structure de l’habitat en Algérie.....	58
II.3.1.	L’habitat rural.....	58
II.3.2.	Habitat urbain .....	60
II.4.	État du secteur résidentiel en Algérie .....	62
II.5.	La Démographie en Algérie .....	63
II.6.	Prévision de la population en Algérie 2020 – 2100.....	64
II.7.	Synthèse .....	65
II.8.	Introduction .....	66
II.9.	Historique de la sismicité de l’Algérie.....	66
II.10.	Le contexte tectonique.....	67
II.11.	Caractéristiques de la sismicité Algérienne .....	68
II.12.	La vulnérabilité du nord algérien .....	69
II.13.	Les séismes majeurs en Algérie .....	70
II.14.	L’action sismique dans le règlement algérien.....	73
II.14.1.	Classification des zones sismiques .....	74
II.14.2.	Classification des sites .....	76
II.14.3.	Classification des ouvrages : .....	76
II.15.	Conclusion .....	77

## **Chapitre III : Proposition d’une méthodologie d’évaluation de la performance sismique des bâtiments d’habitation en Algérie**

III. 1.	Introduction .....	78
III. 2.	Méthodologie proposée.....	78
III.2. 1.	Structure de la méthodologie.....	78

III.2. 2. Les approches TOP-DOWN et BOTTOM-UP : deux approches opposées ou complémentaires ? .....	79
III. 3. Approche diagnostic descendante – "Top-down" .....	79
III.3. 1. Identification des IPS .....	80
III.3. 2. Méthodes de calcul : .....	81
III.3. 3. Echelle de performance.....	86
III.3.3. 1. Echelle de performance pour le critère stabilité du sol (Stabsol).....	86
III.3.3. 2. Echelle de performance pour le critère agressivité chimique (AgrChim) : ....	87
III.3.3. 3. Echelle de performance pour le critère Conception architecturale (ConcArch)	88
III.3.3. 4. Echelle de performance pour le critère Système structurel (SysStr) .....	89
III.3.3. 5. Echelle de performance pour le critère Etat de la structure (EtatStr) .....	90
III.3.3. 6. Echelle de performance pour le critère Age et sexe .....	92
III.3.3. 7. Echelle de performance pour le critère Qualité de vie (QualVie) .....	92
III.3.3. 8. Echelle de performance pour le critère Secourisme (Secour) .....	94
III.3.3. 9. Echelle de performance pour le critère Accessibilité (Acces) .....	94
III.3.3. 10. Echelle de performance pour la Vulnérabilité environnementale (VulnEnv)	94
III. 4. Approche diagnostic ascendante – "Bottom-up" .....	95
III.4. 1. Description du processus d'agrégation adopté .....	96
III.4. 2. La méthode de la somme pondérée (MSP).....	96
III.4. 3. La méthode AHP standard.....	97
III.4.3. 1. Hiérarchisation des critères par importance .....	97
III.4.3. 2. Comparaison deux à deux des critères .....	97
III.4.3. 3. Détermination des poids associés à chaque critère .....	99
III.4.3. 4. Vérification de la consistance des résultats .....	100
III. 5. Conclusion.....	101

## **Chapitre IV : Application de la méthodologie proposée sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans la ville de Bouira**

IV.1. Introduction .....	102
IV.2. Présentation des cas d'étude.....	102
IV.3. Calcul des performances des IPs .....	109
IV.4. Pondération des IPs – Méthode AHP.....	116
IV.4.1. Pondération des IPs du critère Sexe.....	116

IV.4.2. Synthèse de calcul des pondérations.....	118
IV.5. Calcul des performances – Méthode MSP .....	119
IV.6. Discussion des résultats .....	128
IV.7. Conclusion.....	129
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>130</b>
<b>Références .....</b>	<b>132</b>

## Liste de figures

### Chapitre I : Étude bibliographique

Figure I. 1. Illustration des composants du risque.....	6
Figure I. 2. Procédure d'évaluation structurale (ASCE, 2000a) .....	7
Figure I. 3. Typologies EMS-98 associées à une classe de vulnérabilité (Grünthal, Musson et Stucchi, 1998) .....	11
Figure I. 4. Niveau de dommages selon EMS-98 (Grünthal, Musson et Stucchi, 1998) .....	12
Figure I. 5. Description des indicateurs de l'EMS-98.....	12
Figure I. 6. Courbes de dégâts typiques pour une classe de vulnérabilité (EMS-98) .....	13
Figure I. 7. Fonctions de vulnérabilité semi-empiriques (Auclair, et al., 2007).....	16
Figure I. 8. Procédure de la méthode Risk-UE .....	17
Figure I. 9. Procédures de calcul de l'indice de vulnérabilité IV selon le type de bâtiment .....	18
Figure I. 10. Loi de comportement et niveaux de dommage (FEMA, 2000) .....	24
Figure I. 11. Courbe de capacité, demande sismique, point de performance (ATC40) .....	25
Figure I. 12. Courbe de capacité d'un bâtiment dans le format (Accélération spectrale-Déplacement spectral) (Risk-UE, 2003).....	25
Figure I. 13. Courbes de fragilités pour les niveaux de dommages « léger, modéré, important ou ruine » (FEMA, 2003 ; Michel, 2007).....	26
Figure I. 14. Recherche de la solution optimum (Brunner et Starkl 2004) .....	33
Figure I. 15. Concept de la méthode MACBETH.....	40
Figure I. 16. Différents types de critères (Vincke, 1994) .....	42
Figure I. 17. Différents types de critères (Vincke, 1994) – Suite .....	43

### Chapitre II : Parc résidentiel algérien et performance sismique – État des lieux

Figure II. 1. Distribution des logements en fonction de leur type Algérie 1999-2018 .....	53
Figure II. 2. Nombre des logements réalisés en Algérie 1999-2018.....	53
Figure II. 3. Les lancements du programme quinquennal 2010 – 2014 .....	54
Figure II. 4. Les lancements du programme quinquennal 2015 – 2019 .....	55
Figure II. 5. Les livraisons du programme quinquennal 2015 – 2019 .....	56
Figure II. 6. Logements livrés au titre de l'année 2020 .....	57
Figure II. 7. Le parc résidentiel en Algérie à l'horizon 2030 .....	58
Figure II. 8. Habitat Rural : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés) par Wilaya - Tous programmes confondus - Années 1999 à 2005 .....	59
Figure II. 9. Habitat Rural : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés) en Algérie - Tous programmes confondus - Années 2007 à 2009 .....	59
Figure II. 10. Habitat Rural : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (Achèvements cumulés) par Wilaya - Tous programmes confondus - Années 2010 à 2011 .....	60

Figure II. 11. Habitat Urbain : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés) par Wilaya - Tous programmes confondus - Années 1999 à 2005 .....	60
Figure II. 12. Habitat Urbain : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés en Algérie - Tous programmes confondus - Années 2007 à 2009 .....	61
Figure II. 13. Habitat Urbain : Répartition des logements urbain inscrits par Wilaya –Tous programmes confondus – Année 2012 .....	61
Figure II. 14. Répartition des livraisons de logements en Algérie 2007-2009 (Hors auto construction) .....	62
Figure II. 15. Répartition des logements urbain et rural livrés par wilaya (hors auto construction) –Tous programmes confondus de 2015 à 2017 .....	62
Figure II. 16. Type de construction résidentiel en Algérie .....	63
Figure II. 17. Structure de la population par âge et par sexe (pour 10 000 personnes) au 01/07/2015 .....	64
Figure II. 18. Répartition de la population sur le territoire (% / à la surface totale) .....	64
Figure II. 19. Prévision de la population en Algérie 1950 – 2100 .....	65
Figure II. 20. Carte de sismicité du nord algérien .....	67
Figure II. 21. Déplacement tectonique des plaques de l’Afrique et de l’Eurasie .....	67
Figure II. 22. La sismicité de l’Algérie .....	68
Figure II. 23. Zones sismiques et degré de vulnérabilité des territoires en Algérie .....	69
Figure II. 24. Spectres de réponse élastiques normalisé pour les 4 types de sites .....	77

### **Chapitre III : Proposition d’une méthodologie d’évaluation de la performance sismique des bâtiments d’habitation en Algérie**

Figure III. 1. Méthodologie adoptée pour l’évaluation de la performance sismique pour un bâtiment d’habitation .....	79
Figure III. 2. Echelle de performance de l’indicateur Fc .....	90
Figure III. 3. Echelle de performance de l’indicateur Nes .....	93
Figure III. 4. Echelle de performance de l’indicateur TO (logements F2 et F3) .....	93
Figure III. 5. Echelle de performance de l’indicateur TO (logements F4 et F5) .....	94
Figure III. 6. Echelle de performance de l’indicateur Amoy .....	95

### **Chapitre IV : Application de la méthodologie proposée sur des cas réels de bâtiments d’habitation dans la ville de Bouira**

Figure IV. 1. Plan de façade et coupe A-A du bloc A .....	103
Figure IV. 2. Plan de terrasse .....	103
Figure IV. 3. Plan du 1er et 5ème étage .....	104
Figure IV. 4. Plan du 2,3 et 4ème étage .....	104
Figure IV. 5. Plan du RDC .....	105
Figure IV. 6. Plan de masse .....	105
Figure IV. 7. Façade principale du bloc C .....	106
Figure IV. 8. Façade postérieure .....	107
Figure IV. 9. Plan de l’étage courant .....	107

Figure IV. 10. Plan du RDC.....	108
Figure IV. 11. Coupe A-A du bloc C .....	108
Figure IV. 12. Performance des IPs du critère StabSol (cas 01).....	109
Figure IV. 13. Performance des IPs du critère AgrChim(cas 01) .....	109
Figure IV. 14. Performance des IPs du critère ConcArch (cas 01) .....	110
Figure IV. 15. Performance des IPs du critère SysStr (cas 01).....	110
Figure IV. 16. Performance des IPs du critère EtatStr (cas 01) .....	110
Figure IV. 17. Performance des IPs du critère Age (cas 01) .....	111
Figure IV. 18. Performance des IPs du critère Sexe (cas 01) .....	111
Figure IV. 19. Performance des IPs du critère QualVie (cas 01).....	111
Figure IV. 20. Performance des IPs du critère Secour (cas 01) .....	112
Figure IV. 21. Performance des IPs du critère Acces (cas 01) .....	112
Figure IV. 22. Performance des IPs du critère StabSol (cas 02).....	112
Figure IV. 23. Performance des IPs du critère AgrChim (cas 02) .....	113
Figure IV. 24. Performance des IPs du critère ConcArch (cas 02).....	113
Figure IV. 25. Performance des IPs du critère SysStr (cas 02).....	113
Figure IV. 26. Performance des IPs du critère EtatStr (cas 02) .....	114
Figure IV. 27. Performance des IPs du critère Age (cas 02) .....	114
Figure IV. 28. Performance des IPs du critère Sexe (cas 02) .....	114
Figure IV. 29. Performance des IPs du critère QualVie (cas 02).....	115
Figure IV. 30. Performance des IPs du critère Secour (cas 02) .....	115
Figure IV. 31. Performance des IPs du critère Acces (cas 02) .....	115
Figure IV. 32. Agrégation des IPs du l'objectif VulnSol .....	120
Figure IV. 33. Agrégation des IPs du l'objectif VulnStr.....	121
Figure IV. 34. Agrégation des IPs du l'objectif VulnSoc.....	122
Figure IV. 35. Agrégation des IPs du l'objectif VulnEnv .....	123
Figure IV. 36. Calcul de la valeur de la vulnérabilité du bloc A .....	124
Figure IV. 37. Agrégation des IPs du l'objectif VulnSol .....	124
Figure IV. 38. Agrégation des IPs du l'objectif VulnStr.....	125
Figure IV. 39. Agrégation des IPs du l'objectif VulnSoc.....	126
Figure IV. 40. Agrégation des IPs du l'objectif VulnEnv .....	127
Figure IV. 41. Calcul de la valeur de la vulnérabilité du bloc C.....	127
Figure IV. 42. Performance sismique des bâtiments des cas étudiés .....	128

## Liste des tableaux

### Chapitre I : Étude bibliographique

Tableau I.1. Classification selon le temps et la difficulté de calcul .....	7
Tableau I.2. Classification selon l'application .....	8
Tableau I.3. Classification typologique et cotes structurelles de base du FEMA-154 (2002) ....	8
Tableau I.4. Classification typologique et cotes structurelles de base du FEMA-154 (2002) – Suite .....	9
Tableau I.5. Sismicité définie dans le FEMA-154 (2002) .....	9
Tableau I.6. L'équivalente entre les niveaux de dommage moyen et les degrés de dommage de l'EMS-98 .....	15
Tableau I.7. Les classes de vulnérabilité communes .....	17
Tableau I.8. Les dommages selon l'échelle EMS-98 .....	19
Tableau I.9. Signification de la comparaison des indices .....	20
Tableau I.10. Signification des résultats du %NBS .....	22
Tableau I.11. Tableau de dommages suivant la méthode CTC .....	28
Tableau I.12. Tableau comparatif des méthodes étudiées .....	29
Tableau I.13. Les méthodes multicritères d'aide à la décision .....	33
Tableau I.14. Echelle de Saaty de la méthode AHP .....	39
Tableau I.15. Tableau de synthèse des méthodes multicritères .....	48
Tableau I.16. Tableau de synthèse des méthodes multicritères- Suite .....	49
Tableau I.17. Tableau de synthèse des méthodes multicritères- Suite .....	50

### Chapitre II : Parc résidentiel algérien et performance sismique – État des lieux

Tableau II. 1. Distribution des logements en fonctions de leurs types .....	53
Tableau II. 2. Structure de la population par âge et par sexe (pour 10 000 personnes) au 01/07/2015 (Source : ONS, 2015) .....	63
Tableau II. 3. Les séismes majeurs en Algérie .....	70
Tableau II. 4. Les séismes majeurs en Algérie- Suite .....	71
Tableau II. 5. Les séismes majeurs en Algérie- Suite .....	72
Tableau II. 6. Les séismes majeurs en Algérie- Suite .....	73
Tableau II. 7. Classification sismique des wilayas d'Algérie .....	74
Tableau II. 8. Classification sismique des wilayas d'Algérie - Suite .....	75
Tableau II. 9. Coefficient d'accélération (rapport préliminaire de la mission AFPS version 8 juillet 2003) .....	76
Tableau II. 10. Paramètres des spectres de réponse en accélération .....	77

### Chapitre III : Proposition d'une méthodologie d'évaluation de la performance sismique des bâtiments d'habitation en Algérie

Tableau III. 1. Tableau de bord de diagnostic de performance sismique (DSP) .....	80
Tableau III. 2. Tableau de bord de diagnostic de performance sismique (DSP) – Suite .....	81

Tableau III. 3. Méthodes de calcul des IPs des critères « StabSol » et « AgrChim » .....	82
Tableau III. 4. Méthodes de calcul des IPs du critère « ConcArch » .....	83
Tableau III. 5. Méthodes de calcul des IPs du critère « SysStr » .....	84
Tableau III. 6. Méthodes de calcul des IPs du critère « EtatStr » .....	85
Tableau III. 7. Méthodes de calcul des IPs de l'objectif « VulnSoc » .....	85
Tableau III. 8. Méthodes de calcul des IPs de l'objectif « VulnEnv » .....	86
Tableau III. 9. Echelle de performance de l'indicateur QS. ....	86
Tableau III. 10. Echelle de performance de l'indicateur CS. ....	86
Tableau III. 11. Echelle de performance de l'indicateur PT. ....	87
Tableau III. 12. Echelle de performance de l'indicateur PCP. ....	87
Tableau III. 13. Echelle de performance de l'indicateur PE. ....	87
Tableau III. 14. Echelle de performance de l'indicateur PS. ....	87
Tableau III. 15. Echelle de performance des IPs du critère AgrChim. ....	87
Tableau III. 16. Echelle de performance de l'indicateur RP. ....	88
Tableau III. 17. Echelle de performance de l'indicateur EP. ....	88
Tableau III. 18. Echelle de performance de l'indicateur REL. ....	88
Tableau III. 19. Echelle de performance de l'indicateur ET. ....	88
Tableau III. 20. Echelle de performance de l'indicateur HB. ....	88
Tableau III. 21. Echelle de performance de l'indicateur PSR. ....	88
Tableau III. 22. Echelle de performance de l'indicateur SC (portique auto stable). ....	89
Tableau III. 23. Echelle de performance de l'indicateur SC (construction mixte). ....	89
Tableau III. 24. Echelle de performance des deux indicateurs PC/PEL. ....	89
Tableau III. 25. Echelle de performance de l'indicateur AC. ....	89
Tableau III. 26. Echelle de performance de l'indicateur CC. ....	89
Tableau III. 27. Echelle de performance de l'indicateur DC. ....	90
Tableau III. 28. Echelle de performance de l'indicateur BA. ....	90
Tableau III. 29. Echelle de performance de l'indicateur AB. ....	90
Tableau III. 30. Echelle de performance de l'indicateur EC. ....	91
Tableau III. 31. Echelle de performance de l'indicateur DS. ....	91
Tableau III. 32. Echelle de performance de l'indicateur CNS. ....	91
Tableau III. 33. Echelle de performance de l'indicateur PR. ....	91
Tableau III. 34. Echelle de performance les indicateurs âge et sexe. ....	92
Tableau III. 35. Echelle de performance de l'indicateur MPH. ....	93
Tableau III. 36. Echelle de performance des indicateurs DH/DPC/DPP. ....	94
Tableau III. 37. Echelle de performance de l'indicateur ACB. ....	94
Tableau III. 38. Echelle de performance de l'indicateur ZL. ....	94
Tableau III. 39. Echelle de performance de l'indicateur ZS. ....	94
Tableau III. 40. Echelle de performance de l'indicateur CCU. ....	95
Tableau III. 41. Echelle d'importance entre indicateurs. ....	98
Tableau III. 42. Valeurs du coefficient RI. ....	101

#### **Chapitre IV : Application de la méthodologie proposée sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans la ville de Bouira**

Tableau IV. 1. Présentation du bâtiment (bloc A). ....	102
Tableau IV. 2. Présentation du bâtiment (bloc C). ....	106
Tableau IV. 3. Attribution des ordres de préférences entre les IPs. ....	116

Tableau IV. 4. Calcul des poids des IPs .....	118
Tableau IV. 5. Calcul des poids des critère .....	119
Tableau IV. 6. Calcul des poids des objectifs .....	119

## Liste des abréviations

**AB** : Age du bâtiment

**AC** : Alignement des éléments verticaux de contreventement

**ACB** : Accessibilité du bâtiment

**Acces** : Accessibilité

**AFPS** :

**AgrChim** : Agressivité chimique

**AHP** : Analytic Hierarchy Process

**Amoy** : Valeurs moyennes d'accélération pour les séismes

**BA** : Bâtiment accolés avec joint insuffisant ou obstrué

**BSH** : Cote structurelle de base

**CC** : Continuité des éléments de contreventement en hauteur

**CCU** : Code de construction utilisé

**CNS** : Risque de chute des éléments non structuraux

**ConcArch** : Conception architecturale

**CRAAG** : Centre de recherche en astronomie, astrophysique et géophysique

**CS** : Catégorie du sol

**DC** : Forte différence de contreventement

**DH** : Distance aux hôpitaux

**DPC** : Distance aux postes de protection civil

**DPP** : Distance aux poste police

**DS** : Désordre structuraux constatés

**EC** : Etat général de conservation

**EMS** : Echelle macrosismique européenne

**EP** : Elancement en plan

**ET** : Etage transparent

**EtatStr** : Etat de la structure

**FE** : Femmes enceintes

**FEMA** : Fédéral Emergency Management Agency  
**FC** : Résistance moyenne a la compression du béton  
**FPE** : Femmes avec plus de 5 enfants  
**HAZUS** : Hazard Us  
**HB** : Hauteur du bâtiment  
**IPs** : Indice de performance sismique  
**IV** : Indice de vulnérabilité  
**LCPC** : Laboratoire central des ponts et chaussées  
**LGIT** : Local Gouvernement Insurance Trust  
**MMAD** : Méthodes multicritères d'aide à la décision  
**MPH** : Mobilité physique des occupants  
**MSP** : Méthode de la somme pondérée  
**NBS** : New buildings standard  
**NES** : Niveau d'éducation et de sensibilisation  
**NIBS** : National institute of buildings science  
**ONS** : Office national des statistiques  
**PA** : Ration de la population âgée  
**PE** : Proximité d'eau  
**PEL** : Poteau élancé  
**PC** : Poteau court  
**PCP** : Proximité changement de pente  
**PF** : Ration de la population féminine  
**PR** : Projet de réhabilitation pour les anciens bâtiments  
**PS** : Proximité de soutènement  
**PSR** : Partie saillante ou rentrante  
**PT** : Pente générale du terrain  
**QS** : Qualité du sol en surface  
**QualVie** : Qualité de vie  
**RE** : Ratio d'enfants

**REL** : Régularité en élévation

**RP** : Régularité en plan

**SC** : Système de contreventement

**Secour** : Secourisme

**StabSol** : Stabilité du sol

**SysStr** : Système structurel

**TO** : Taux d'occupation des logements

**VulnSoc** : Vulnérabilité sociale

**VulnSol** : Vulnérabilité du sol

**VulnStr** : Vulnérabilité de la structure

**ZL** : Présence de zone libre

**ZS** : Zonage sismique

## Résumé

En Algérie, au cours des dernières années, les risques de catastrophes ont augmenté en raison du surpeuplement, de l'utilisation déféctueuse de l'aménagement du territoire, de la construction d'infrastructures et de services inadéquats et de la dégradation de l'environnement. L'ancien parc immobilier, qui constitue une grande partie du parc immobilier, est le plus vulnérable et présente le plus grand risque d'effondrement lors d'un séisme. Toutes ces raisons font de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation une nécessité.

D'une autre part, la vulnérabilité sociale fait autant partie du risque que les dommages aux bâtiments et les pertes économiques ; La vulnérabilité sociale fait référence à la capacité d'une communauté humaine exposée à l'impact d'un aléa naturel (dans ce cas, un tremblement de terre) de résister, de faire face et de se remettre de cet impact.

D'après une étude publiée par l'Office Nationale des Statistiques, plus de 90% de la population est concentrée dans la région nord de l'Algérie (ensemble tellien et hauts plateaux). Cette partie appartient à la ceinture périméditerranéenne où les plaques lithosphériques africaines et eurasiennes convergent dans le sens NW-SE. La déformation régionale induite par ce mouvement de confrontation engendre des séismes d'intensités moyennes à fortes

La présente étude constitue une contribution à la mise en place d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments d'habitation dans le contexte algérien. Cette méthodologie est basée sur deux approches complémentaires : l'approche descendante (Top-down) et l'approche ascendante (Bottom-up). La première est descriptive diagnostic descendante qui a pour but de construire un tableau de bord regroupant les différents indicateurs d'évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment d'habitation. La deuxième est une agrégation multicritère basée sur la méthode de la somme pondérée et qui a pour but de calculer les performances des critères et objectifs de vulnérabilité. Le calcul des poids des indicateurs se fera par la méthode AHP.

Dans le but de démontrer la méthodologie développée, nous la confrontons avec deux cas d'étude réels. Nous avons choisi deux bâtiments d'habitation dans la Wilaya de Bouira par rapport à la disponibilité des données nécessaires pour évaluer la performance globale. Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

**Mots clés :** Vulnérabilité, bâtiment d'habitation, indicateur de performance, méthode AHP, agrégation multicritère.

## Abstract

In Algeria, in recent years, disaster risks have increased due to overcrowding, poor use of land use planning, construction of inadequate infrastructure and services, and environmental degradation. The old housing stock, which constitutes a large part of the housing stock, is the most vulnerable and presents the greatest risk of collapse during an earthquake. All these reasons make assessing the seismic vulnerability of residential buildings a necessity.

On the other hand, social vulnerability is as much a part of the risk as damage to buildings and economic losses ; Social vulnerability refers to the ability of a human community exposed to the impact of a natural hazard (in this case, an earthquake) to resist, cope with and recover from that impact.

According to a study published by the National Statistics Office, more than 90% of the population is concentrated in the northern region of Algeria (the Tellien region and the highlands). This part belongs to the perimediterranean belt where the African and Eurasian lithospheric plates converge in the NW-SE direction. The regional deformation induced by this movement of confrontation generates earthquakes of medium to strong intensities

This study constitutes a contribution to the establishment of a methodology for assessing the vulnerability of residential buildings in the Algerian context. This methodology is based on two complementary approaches: the top-down approach and the bottom-up approach. The first is descriptive top-down diagnosis which aims to build a dashboard grouping the various indicators for assessing the vulnerability of a residential building. The second is a multicriteria aggregation based on the weighted sum method and which aims to calculate the performance of the vulnerability criteria and objectives. The indicator weights will be calculated using the AHP method.

In order to demonstrate the methodology developed, we compare it with two real study cases. We chose two residential buildings in the Wilaya of Bouira based on the availability of the data necessary to assess the overall performance. The results obtained are presented and discussed.

**Keywords** : Vulnerability, residential building, performance indicator, AHP method, multicriteria aggregation.

# ملخص

في الجزائر، في السنوات الأخيرة، زادت مخاطر الكوارث بسبب الاكتظاظ، وسوء استخدام تخطيط استخدام الأراضي، وبناء البنية التحتية والخدمات غير الملائمة، والتدهور البيئي. يعتبر مخزون المساكن القديمة، الذي يشكل جزءًا كبيرًا من مخزون المساكن، هو الأكثر عرضة للخطر ويمثل أكبر مخاطر الانهيار أثناء الزلزال. كل هذه الأسباب تجعل تقييم الضعف الزلزالي للمباني السكنية ضرورة

من ناحية أخرى، يعد الضعف الاجتماعي جزءًا من المخاطر مثل الأضرار التي تلحق بالمباني والخسائر الاقتصادية؛ يشير الضعف الاجتماعي إلى قدرة المجتمع البشري المعرض لتأثير الخطر الطبيعي (في هذه الحالة، الزلزال) على مقاومة هذا التأثير والتعامل معه والتعافي منه

وفقًا لدراسة نشرها مكتب الإحصاء الوطني، يتركز أكثر من 90% من السكان في المنطقة الشمالية من الجزائر (منطقة تيليان والمرتفات). ينتمي هذا الجزء إلى الحزام المحيط المتوسطي حيث تلتقي صفائح الغلاف الصخري الإفريقية والأوراسية في اتجاه شمال غرب وجنوب شرق. إن التشوه الإقليمي الناجم عن حركة المواجهة هذه يولد زلازل من شدة متوسطة إلى قوية

تشكل هذه الدراسة مساهمة في وضع منهجية لتقييم هشاشة المباني السكنية في السياق الجزائري. تعتمد هذه المنهجية على نهجين تكميليين: النهج من أعلى إلى أسفل والنهج التصاعدي. الأول هو التشخيص الوصفي من أعلى إلى أسفل والذي يهدف إلى بناء لوحة معلومات تجمع المؤشرات المختلفة لتقييم ضعف مبنى سكني. والثاني هو تجميع متعدد المعايير يعتمد على طريقة المجموع المرجح ويهدف إلى حساب أداء معايير وأهداف الضعف. سيتم حساب أوزان المؤشر باستخدام طريقة AHP.

من أجل توضيح المنهجية التي تم تطويرها، قمنا بمقارنتها بحالتين دراسيتين حقيقيتين. اخترنا مبنين سكنيين بولاية البويرة بناءً على توفر البيانات اللازمة لتقييم الأداء العام. يتم عرض النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها

الكلمات المفتاحية: الضعف، المباني السكنية، مؤشر الأداء، التجميع متعدد المعايير

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Le nord de l'Algérie appartient à la ceinture périméditerranéenne où les plaques lithosphériques africaine et eurasienne convergent dans le sens NW-SE. La déformation régionale induite par ce mouvement de confrontation engendre des séismes d'intensités moyennes à fortes. Au cours des dernières décennies deux séismes destructeurs se sont produits, à savoir les tremblements de terre El-Asnam,  $M_s = 7.3$  (1980) et de Zemmouri,  $M_w = 6.8$  (2003), faisant plus de cinq mille (5000) victimes. D'autre part, et d'après l'Office Nationale des Statistiques, cette partie (ensemble tellien et hauts plateaux) abrite plus de 90% de la population.

En Algérie, au cours des dernières années, les risques de catastrophes naturelles (sismique notamment) ont augmenté non seulement en raison de cette position géographique vis-à-vis des plaques lithosphériques et du surpeuplement des régions nord mais aussi à cause de l'utilisation défectueuse de l'aménagement du territoire, de la construction d'infrastructures et de services inadéquats et de la dégradation de l'environnement.

Les catastrophes naturelles, dont les tremblements de terre, posent des défis aigus aux gestionnaires des centres urbains. L'activité sismique reste forte dans le nord de l'Algérie puisque pas moins de 30 séismes par mois sont enregistrés dans la région. L'évaluation et l'analyse des dommages subis à la suite des derniers tremblements de terre en Algérie ont mis en évidence la vulnérabilité sismique des bâtiments existants, cette vulnérabilité, combinée à une concentration importante de bâtiments construits avant l'introduction des normes parasismiques, peut entraîner un risque sismique élevé, même dans les zones où la sismicité est considérée modérée. La chaîne d'évaluation et de gestion du risque présente un caractère pluridisciplinaire. Elle comporte quatre maillons principaux : connaissance de l'aléa, estimation de la vulnérabilité, évaluation du risque et prise de décision. Les objectifs de l'étude de la vulnérabilité sismique à grande échelle sont multiples, nous retiendrons l'estimation du nombre de victimes, des dommages et des coûts pour un scénario et l'estimation du risque pour hiérarchiser les priorités de renforcement des bâtiments.

La vulnérabilité sismique directe est exprimée par une fonction de dommages attendus aux constructions (légers, modérés, graves, effondrement) selon l'intensité de l'événement. Evaluer la vulnérabilité sismique d'une structure signifie donc exprimer de telles fonction de dommages, c'est à dire en d'autres mots prévoir le comportement d'une structure donnée lors d'un séisme donné.

Différents travaux de recherche ont permis de développer des outils d'évaluation de la vulnérabilité sismique des installations existantes (bâtiments, ponts, infrastructures souterraines, etc.) parmi ces outils c'est l'adaptation des différentes méthodes comme la méthode RISK-UE, la méthode HAZUS, la méthode CETE Méditerranée ... etc . Chaque méthode sert à quantifier et évaluer les paramètres pertinents.

## Objectif et problématique de la recherche

L'objectif principal de cette étude, dans sa première partie, est de discuter les méthodologies d'évaluation de la performance sismique existante, puis de développer une approche pour déterminer le niveau de la qualité sismique des bâtiments d'habitation en Algérie en se basant sur les méthodes multicritères d'aide à la décision.

Pour cueillir le fruit de cette étude il nous faut passer par plusieurs étapes :

- Quantification des IPs en raison de la disponibilité des données ;
- Choix des coefficients de pondération en raison de la part de subjectivité du décideur ;
- La proposition des échelles des performances dans le cas où celles-ci ne sont pas citées dans la littérature existante ;
- La difficulté de proposer des méthodes de calculs adéquates surtout dans le cas d'indicateurs de performance structurelles ;
- Le choix de la méthode d'agrégation et de pondération des indicateurs en raison de leur diversité et de leur complexité.

## Structure du mémoire

Ce mémoire est composé de quatre chapitres, de la présente introduction à la conclusion générale.

Le premier chapitre est dévissé en deux parties :

- La première est destinée à l'étude des différentes méthodes et/ou de travaux de recherche (publications scientifiques, thèses de doctorat, mémoires de magister, etc.) sur le sujet de la vulnérabilité et de la performance sismique des bâtiments d'habitation.
- La deuxième concernera les méthodes multicritères d'aide à la décision.

Le deuxième chapitre sera dévissé en deux parties aussi :

- Dans la première partie, nous allons présenter :
  - Quelques informations statistiques sur le parc résidentiel en Algérie : parc bâti, programmes de logements réalisés, en cours de réalisation et futur, répartition sur les wilayas, parc ancien et nouveau, etc.
  - Quelques informations statistiques sur la démographie de l'Algérie : population, concentration de la population, occupation des logements, etc.
- Dans la deuxième partie, nous allons présenter la sismicité de l'Algérie (historique, zones sismiques, etc.).

Dans le troisième chapitre La première partie sera dédiée à l'approche descendante « Top-down » pour la définition des différents aspects et critères d'évaluation de la performance sismique d'un bâtiment d'habitation. C'est une partie de diagnostic de la qualité sismique des bâtiments d'habitation.

La deuxième partie sera dédiée à l'approche ascendante « Bottom-up » pour l'évaluation des niveaux de performance de chaque critère d'évaluation retenu. Dans cette partie nous allons utiliser la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), Alors il faut en parler dans le premier chapitre (méthodes multicritères d'aide à la décision).

Enfin on présente dans le quatrième chapitre, la méthodologie développer sera appliquée sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans la région de Bouira. Les résultats obtenus seront présentés puis discuter et des conclusions.

# Recherche bibliographique – État actuel des connaissances sur le sujet

*L'évaluation de la vulnérabilité sismique est une branche spécialisée de l'ingénierie civile ayant pour but d'apprécier les niveaux de sécurité des structures lors de séismes. La maîtrise d'un tel champ de compétence mobilise des connaissances approfondies dans différentes branches de la spécialité (conception, calcul structurel, réalisation, etc.). La littérature fait ressortir une grande variété de méthodologies, développées dans des contextes locaux, pour apprécier la vulnérabilité des bâtiments d'habitation aux séismes. Dans la première partie du présent chapitre, nous essayerons de faire un état de l'art, le plus exhaustif possible, de ces différentes méthodes. Dans la deuxième partie, nous aborderons les méthodes multicritères d'aide à la décision (MMAD) qui gagnent du terrain dans différents domaines d'ingénierie ou l'ingénierie civile ne fait pas exception.*

## Partie 01

# Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments – Terminologies, définitions et méthodes d'évaluation

---

## I.1 Introduction

Le séisme est le risque naturel majeur le plus meurtrier, tant par ses effets directs que par les phénomènes induits (mouvements de terrain, tsunamis, etc.). En outre, ces phénomènes peuvent aussi conduire à des pertes économiques parfois indélébiles par les pays touchés. Durant les dernières décennies, le monde a connu plusieurs séismes de moyenne à grande magnitude, qui ont touchés plusieurs pays dont l'Algérie, causant de très grandes pertes (humaines et matérielles). Le niveau de performance de certaines constructions au cours de ces séismes était faible, et de plus, le niveau des dommages structurels très grand. Ce qui a eu pour conséquence, le besoin de détermination et de l'évaluation des dommages dans les structures plus que jamais.

## I.2 Définitions et terminologies

### I.2.1. Magnitude sismique

La magnitude est introduite par Richter en 1935, elle représente une quantité logarithmique calculée (une mesure de l'énergie dégagée lors d'un tremblement de terre), soit à partir de l'amplitude du signal enregistré par des sismographes, soit à partir de sa durée. La magnitude est une fonction continue qui en principe n'a pas de limites. En réalité, sa valeur minimale est limitée par la sensibilité des sismographes, tandis que sa valeur maximale dépend de la longueur de la faille susceptible de se fracturer d'un seul coup.

### **I.2.2. Intensité sismique**

Une intensité sismique caractérise les effets et les dommages d'un séisme en un lieu donné. L'intensité en un lieu donné dépend non seulement de la magnitude du séisme, mais aussi de sa profondeur, de la distance du lieu à l'épicentre (donc ce n'est pas un critère intrinsèque au phénomène naturel) et des effets de site (nature du terrain). Elle rend compte d'un certain état de l'environnement humain face à l'occurrence d'un séisme (constructions importantes, état de la construction, degré de préparation de la population...).

### **I.2.3. Aléa sismique**

L'aléa est un événement menaçant ou une possibilité d'être exposé aux secousses telluriques dans une période précise. La précision de l'aléa repose sur une bonne connaissance au niveau régional du contexte géologique et tectonique de la sismicité historique et instrumentale.

L'occurrence d'un séisme a un endroit dépend à la fois de mécanismes régionaux (tectonique, géologie) à grande échelle, et de spécificité locales (relief configuration, nature du sol et la sensibilité aux phénomènes induits). L'aléa est donc usuellement découpé en une composante régionale et une spécificité locale.

### **I.2.4. Risque sismique**

Le risque sismique est la probabilité de survenue d'un séisme (aléa), sa gravité dans le cas où il survient (dommages et pertes) et l'estimation du niveau de connaissances du problème (approches probabilistes) d'origine naturelle ou humaine (Figure I.1). Les effets peuvent mettre en péril un grand nombre de personnes, occasionner des dégâts importants et dépasser les capacités de réaction des instances directement concernées. Le passage de l'aléa au risque suppose la prise en compte de la vulnérabilité des enjeux soumis à cet aléa.

Le risque sismique est donc la combinaison entre l'aléa sismique en un point donné et la vulnérabilité des enjeux qui s'y trouvent exposés (personnes, bâtiments, infrastructures...). L'importance des dommages subis dépend ainsi très fortement de la vulnérabilité des enjeux à cet aléa.

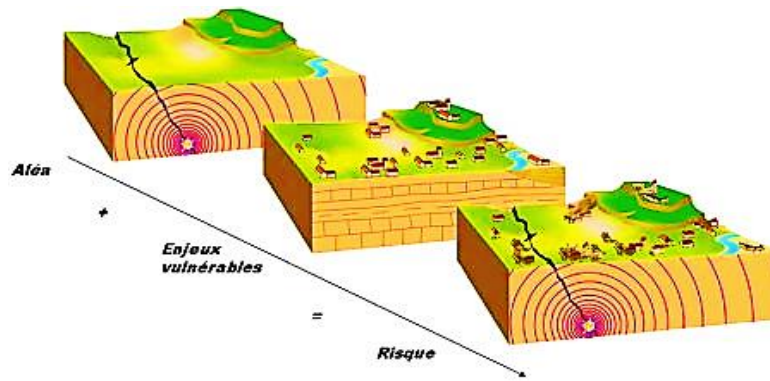


Figure I. 1. Illustration des composants du risque

### I.2.5. Vulnérabilité sismique

La vulnérabilité sismique caractérise la capacité des bâtiments et des structures à supporter les secousses sismiques (vulnérabilité physique), et la capacité des populations à se comporter de façon cohérente et raisonnée face à un évènement majeur (vulnérabilité sociale). Dans ces deux cas, il est important de traduire notre méconnaissance des comportements afin d'en tenir compte dans notre estimation globale.

La vulnérabilité est le produit d'un aléa (probabilité de l'évènement) par le montant des dommages qu'il provoque, elle s'exprime généralement en unité monétaire ou parfois en degrés de dommages :  $V = P_{aléa} \times C_{dommages}$

## I.3 Évaluation sismique

L'évaluation sismique qui vise à vérifier la performance d'un bâtiment pour une intensité sismique donnée est un outil important dans l'évaluation de la vulnérabilité sismique d'un bâtiment ou d'un ensemble de bâtiments. L'évaluation sismique est une application particulière des procédures d'évaluations structurales s'appliquant à l'ensemble des cas de chargement sollicitant un bâtiment.

Selon [Melchers \(2001\)](#) l'évaluation structurale vise à estimer la capacité de la structure à avoir une performance future acceptable pour les conditions et les charges appropriées. La procédure d'évaluation structurale la plus courante est celle recommandée par l'American Society of Civil Engineering ([ASCE, 2000a](#)). Elle est constituée de deux phases d'évaluation :

- 1- L'évaluation sommaire ou préliminaire : qui a pour objectif de déterminer si des travaux de réparation sont exigés ou si une évaluation plus détaillée est nécessaire ;
- 2- L'évaluation détaillée : qui n'est requise que si l'information obtenue lors de l'évaluation préliminaire est insuffisante pour déterminer la nécessité et l'ampleur des travaux à effectuer.

Le schéma de la **Figure I.2** illustre les étapes principales de l'évaluation structurale. Cette procédure est générale et s'adresse à la vérification de la performance de la structure pour l'ensemble des cas de chargement.

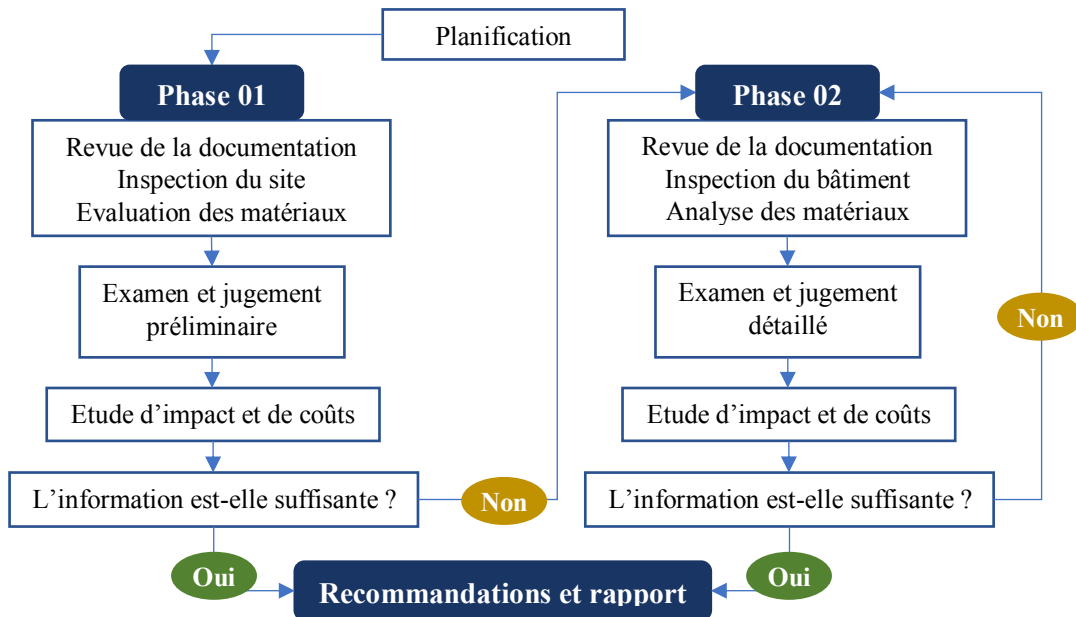


Figure I. 2.Procédure d'évaluation structurale (ASCE, 2000a)

## I.4 Méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique

L'évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment, ou d'un ensemble de bâtiments, nécessite l'estimation des dommages potentiels aux différents types de structures et selon différentes intensités sismiques. Afin d'estimer les dommages probables, on a recouru à des approches empiriques ou à des analyses dynamiques théoriques des structures à l'étude (Kassoul.A, 2016).

Les approches pour l'évaluation de la vulnérabilité sont multiples et peuvent être classées soit selon leur degré de difficulté en termes de temps de calcul (Lang, 2002), ou selon qu'on évalue la vulnérabilité d'un seul bâtiment ou d'un ensemble de bâtiment (Augusti et Ciampoli, 2000).

Ces deux classifications sont illustrées respectivement dans les Tableaux I.1 et I.2.

Tableau I.1.Classification selon le temps et la difficulté de calcul

Investissement	Temps et difficulté de calcul →				
	Ensemble de bâtiments		Bâtiment unique		
Application	Observation de la vulnérabilité résultant de séismes		Jugement expert	Modèles analytiques simples	Attribution de pointage
Méthodes					Analyses détaillées

**Tableau I.2.** Classification selon l'application

Application	Méthode
Bâtiment unique	Analyse structurale détaillée
	Analyse du comportement structural
	Analyse structurale par macro-éléments
	Analyse structurale simplifiée
	Jugement expert
Approches statistiques pour un ensemble de bâtiments	Classification typologique (DPM)
	Indice de vulnérabilité (pointage)
	Evaluations qualitatives
	Procédures hybrides

### I.4.1. Les méthodes empiriques

#### I.4.1.1. La méthode FEMA 154

La première édition du manuel américain d'inspection des structures du Fédéral Emergency Management Agency est paru en 1988 (M.Boutin, 2013) pour objectif d'établir des procédures simples permettant tant aux spécialistes qu'aux non-initiés d'identifier le risque dans un bâtiment à partir d'une inspection visuelle. La version la plus récente, publiée en 2002 (M.Boutin, 2013), considère les mouvements du sol ayant une probabilité de dépassement de 2 % sur 50 ans

#### Principe de la méthode

Avec la méthodologie HAZUS également développée par FEMA, remplaçant les fonctions d'endommagement utilisées, cette méthode permet d'obtenir une estimation directe du risque sismique.

Suite à une évaluation visuelle rapide d'un bâtiment, on lui attribue une cote structurelle de base BSH selon sa typologie parmi 15 types de bâtiments définis dans le tableau suivant :

**Tableau I.3.** Classification typologique et cotes structurelles de base du FEMA-154 (2002)

Type de structure	Description	Cote initiale BSH		
		Sismicité		
		Faible	Moyenne	Elevée
Structure de bois	W1 Charpente de bois (< 5000 pi <sup>2</sup> )	7.4	5.2	4.4
	W2 Charpente de bois (> 5000 pi <sup>2</sup> )	6.0	4.8	3.8
Ossatures en acier	S1 résistant au moment	4.6	3.6	2.8
	S2 contreventée en acier	4.8	3.6	3.0
	S3 légère en acier	4.6	3.8	3.2
	S4 avec murs de cisaillement en béton	4.8	3.6	2.8
	S5 avec murs de remplissage en maçonnerie	5.0	3.6	2.0

**Tableau I.4.** Classification typologique et cotes structurelles de base du FEMA-154 (2002) – Suite

Type de structure	Description	Cote initiale BSH		
		Sismicité		
		Faible	Moyenne	Elevée
Béton	C1 Ossature en béton résistant aux moments	4.4	3.0	2.5
	C2 Murs de béton travaillant en cisaillement	4.8	3.6	2.8
	C3 Ossature avec murs de remplissage en maçonnerie	4.8	3.2	1.6
	PC1 Murs en béton préfabriqués	4.4	3.2	2.6
	PC2 Ossature en béton préfabriquée	4.6	3.2	2.4
Maçonnerie	RM1 M. porteuse armée diaphragmes flexibles	4.8	3.6	2.8
	RM2 M. porteuse armée diaphragmes rigides	4.6	3.4	2.8
	URM Maçonnerie non armée	4.6	3.4	1.8

Concrètement, FEMA-154 utilise trois formulaires distincts selon le niveau d'intensité sismique de la zone dans laquelle est situé le bâtiment à l'étude. Les limites régissant le niveau de sismicité proviennent du spectre de réponse en accélération dont la valeur est fournie, aux États-Unis, dans la norme FEMA-310.

**Tableau I.5.** Sismicité définie dans le FEMA-154 (2002)

Sismicité	PGA(T=0.2sec)	PGA (T=1sec)	MMI*
Faible	<0,167g	<0,067g	VI
Moyenne	0,167g à 0,5g	0,067g à 0,2g	VII, VIII
Elevée	≥ 0,5g	≥ 0,2g	IX

Chacun de ces formulaires permet ensuite de déterminer une cote de base pour le risque sismique BSH. Dans la première édition du FEMA-154 en 1988 (ou ATC-21), la cote structurelle de base (BSH) était développée à partir des matrices de dommages probables définies dans le rapport ATC-13 (ATC, 1985) pour 12 types de bâtiments. Dans ce rapport, les probabilités de dommages étaient établies à partir de l'opinion d'experts pour différentes intensités sismiques de l'échelle de Mercalli modifiée (MM). Dans la deuxième édition du FEMA - 154 (BSSC, 2002) on intègre les nouvelles connaissances sur l'aléa sismique et sur la performance des bâtiments. La cote BSH est maintenant établie à partir des courbes de fragilité obtenues par le logiciel HAZUS©, qui caractérise l'aléa sismique en termes d'accélération spectrale maximale.

Les raisons principales ayant amené à ces changements sont de plusieurs ordres :

- 1- La tendance générale parmi les ingénieurs à utiliser l'accélération spectrale comme paramètre de dimensionnement ;
- 2- La disponibilité des cartes d'aléa sismique en termes d'accélération spectrale ;
- 3- La corrélation de plus en plus apparente entre la performance des bâtiments et le niveau d'accélération spectrale ;
- 4- Les efforts continus du FEMA pour améliorer les courbes de fragilité de HAZUS© pour 12 types de bâtiments ;
- 5- Le fait que HAZUS© constitue aux États-Unis une source reconnue et complète d'information.

Dans le FEMA-154 2002, la cote BSH correspond à la probabilité d'effondrement d'un type de bâtiment pour le séisme maximum probable. Elle est calculée par le négatif du logarithme en base 10 de cette probabilité :

$$BSH_{2002} = -\log_{10}[\Pr(\text{effondrement})]$$

La BSH est ensuite modifiée par l'ajout ou la soustraction de facteurs de modification de la performance SM établis selon les déficiences observées pour les différentes classes de bâtiment. La cote finale S est la mesure de la probabilité d'effondrement du bâtiment à l'étude.

$$S = BSH + \sum SM$$

Les caractéristiques structurales considérées par les facteurs de modification SM sont les suivantes :

- 1- Hauteur du bâtiment : moyenne ou élevée ;
- 2- Irrégularités : horizontales ou verticales ;
- 3- Année de conception et de construction : pré-code et post-année de référence ;
- 4- Types de sol.

La cote finale S varie théoriquement entre 0 et 9,8 et on recommande de procéder à une analyse détaillée pour tout bâtiment ayant obtenu une cote inférieure à 2.

Dans cette approche, la cote structurale de base BSH dépend de la zone d'aléa sismique et de la vulnérabilité reliée à la tenue au séisme du bâti (typologie et déficiences structurelles). Il s'agit donc d'une cote donnant la classification du risque sismique associé au bâtiment sans considération de la valeur des pertes économiques ou humaines. Seule une note est indiquée sur le formulaire concernant le nombre de personnes occupant le bâtiment et la classe de fonctions de ce dernier.

**I.4.1.2. La méthode EMS-98**

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.

**Description de la méthode**

L’Échelle Macrosismique Européenne (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 XXIIIe 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 à la Figure I.3.

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 I. 3.** Typologies EMS-98 associées à une classe de vulnérabilité (Grünthal, Musson et Stucchi, 1998)

Les statistiques autour des dommages enregistrés sur les structures montrent, en effet, que le niveau de dommage est contrôlé par les caractéristiques du système résistant (type d'éléments verticaux et horizontaux). Par ailleurs, l'introduction de cinq niveaux de dommages (Figure I.4) facilite la définition de l'intensité sismique et de la probabilité qu'une structure subisse ce niveau de dommage (Combescur, Gueguen et Lebrun, 2005). Les résultats sont présentés sous forme de matrice de dommages probables (DPM) ou de courbes de vulnérabilité où le dommage est associé à la probabilité de dépassement.






Classification des dégâts aux bâtiments en maçonnerie	
	<b>Degré 1: Dégâts négligeables à légers</b> (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux) Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rares cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.
	<b>Degré 2: Dégâts modérés</b> (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés) Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grands morceaux de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.
	<b>Degré 3: Dégâts sensibles à importants</b> (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants) Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles des toits se détachent. Fractures des cheminées à la jonction avec le toit; défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons, murs pignons).
	<b>Degré 4: Dégâts très importants</b> (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants) Défaillance sérieuse des murs; défaillance structurale partielle des toits et des planchers.
	<b>Degré 5: Destruction</b> (dégâts structuraux très importants) Effondrement total ou presque total.

Figure I. 4. Niveau de dommages selon EMS-98 (Grünthal, Musson et Stucchi, 1998)

L'EMS-98 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 ».

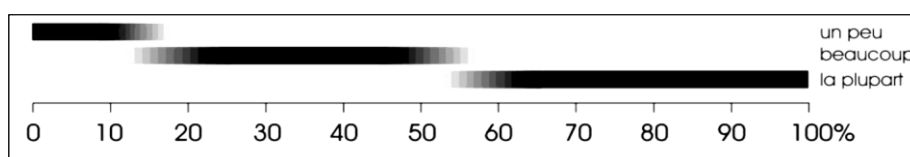
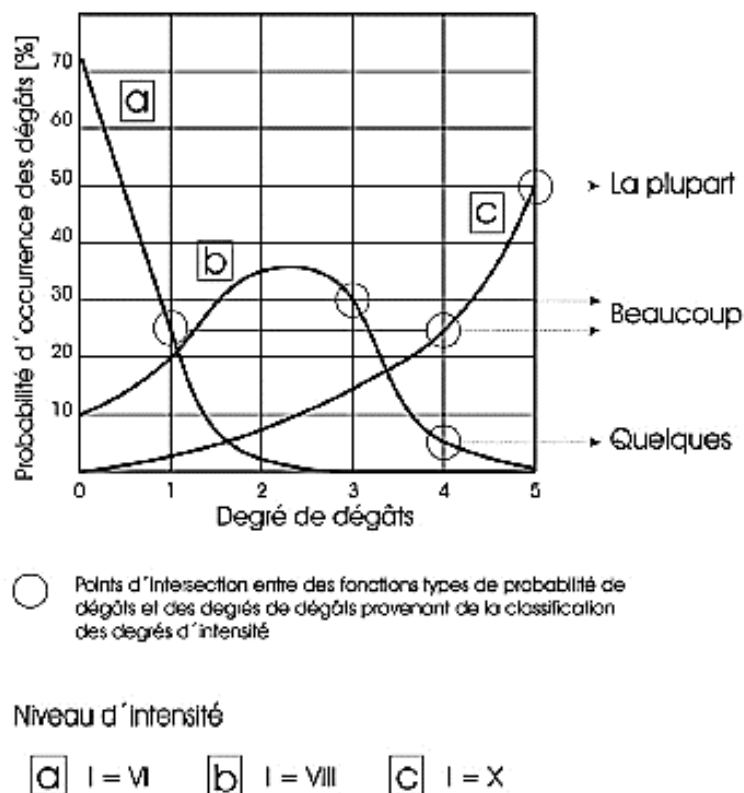


Figure I. 5. Description des indicateurs de l'EMS-98

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 I.6** illustre les courbes de dégâts qu'on obtiendrait pour une classe de vulnérabilité donnée. On remarque qu'à une intensité sismique supérieure (courbe-c) et à une intensité sismique inférieure (courbe-a), la distribution normale devient respectivement, monotone croissante et monotone décroissante étant donné que les degrés de dommages des extrémités représentent des situations limites. Les cercles sur ces courbes sont les descriptions des dégâts aux différentes intensités de l'échelle EMS-98.



**Figure I. 6.** 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.

#### I.4.1.3. La méthode VULNERALP

VULNERALP est une adaptation de la méthode GNDT, c'est une méthode qualitative élaborée par le LCPC/LGIT dans le cadre du projet VULNERALP et par l'AFPS dans le cadre du groupe de travail « Vulnérabilité du bâti existant : approche d'ensemble ». Sur la base de

l'identification, via des fiches de relevés, de critères architecturaux et constructifs, cette approche permet d'attribuer un indice de vulnérabilité global à la construction étudiée.

- Niveau 0 : une phase préliminaire d'inventaire de la typologie de l'EMS 98 ET d'analyse des dommages provoquée sur une bâtis précise ;
- Niveau 1.0 : est une sorte de fiche technique sur les bâtiments rassurants quelque informations nécessaires tels que : matériaux de construction, lieu d'implantation etc. Par conséquent un indice de vulnérabilité sera estimé par le groupe gestionnaire avec une marge d'incertitude importante ;
- Niveau 1.1 : base de données plus détaillée, assuré par une compétence de technicien bien formé pour objectif de diminuer la marge d'incertitude fourni dans le niveau précédent ;
- Niveau 2.0 : l'intervention de l'ingénieur.

#### **I.4.1.4. La méthode de RISK-UE**

La méthodologie Risk-UE a été développée dans le cadre d'un projet européen d'évaluation du risque sismique à sept grandes villes européennes : Barcelone (Espagne), Nice (France), Catania (Italie), Bucarest (Roumanie), Sofia (Bulgarie), Thessalonique (Grèce) et Bitola (Macédoine) (Spence et Lebrun, 2006). L'étude a débuté en janvier 2001, et s'est étalée sur une période de trois ans. Elle a été pilotée par plusieurs universités et laboratoires de recherche, et a abouti à une méthodologie d'analyse du risque sismique des constructions en Europe.

Deux méthodes ont été établies pour évaluer la vulnérabilité des bâtiments :

- Une méthode macrosismique, le niveau 1, reposant sur l'affectation aux bâtiments d'un indice de vulnérabilité, définissant des courbes de vulnérabilité et de fragilité ;
- Une méthode mécanique, le niveau 2, basée sur des analyses analytiques de la structure basée sur des modélisations dynamiques ou des modélisations simplifiées.

Dans RISK-UE, une méthode de niveau 2 a également été développée basée sur l'analyse de la capacité d'une structure à dissiper de l'énergie. Cette méthode nécessitant des moyens et des compétences plus larges pour une analyse à grande échelle. La méthode classe les bâtiments selon une typologie propre à la méthode, dans l'optique de produire une typologie commune de structure plus détaillée que celle de l'EMS-98.

Le principe des méthodes Risk-UE consiste à calculer un indice "IV" qui varie généralement entre 0 (non vulnérable) et 1 (très vulnérable), et qui sera un indicateur de l'état de la structure.

Elle donne un indice de vulnérabilité pour chaque type de bâtiment, en se basant sur plusieurs paramètres comme : les matériaux de constructions, le nombre, l'état des constructions...etc., afin d'attribuer un indices de vulnérabilité de base à chaque classe de la typologie (Milutinovic et Tenda fi Loski, 2003).

Cet indice correspondant à une Valeur moyenne de la vulnérabilité  $IV^*$  de chaque typologie constructive, établi avec une fourchette des limites inférieure  $IV^-$  et supérieure  $IV^+$  probables et à la Valeur extrême minimale  $IV_{min}$  et maximal  $IV_{max}$  de la vulnérabilité, si la valeur de l'indice de vulnérabilité d'un bâtiment dépasse 1.02 l'indice final  $IV$  sera ramené à la valeur  $IV_{max}$ . Les facteurs modificatifs sont ensuite appliqués à  $IV^*$ , pour tenir compte de la hauteur, les irrégularités, la position...etc. L'indice final de vulnérabilité "IV" selon Risk-UE (Milutinovic et al., 2003) est donné par l'expression suivante :

$$IV = IV^* + \Delta V_m + \Delta V_r$$

À partir de l'indice de vulnérabilité calculé précédemment, il est possible de dresser des cartes de dommages. À partir de l'indice de vulnérabilité ( $IV$ ), il est possible d'estimer les dommages en fonction de dommage moyen ( $\mu_D$ ) qui représente la moyenne des dommages pour des bâtiments de même indice de vulnérabilité soumis à une intensité donnée selon la relation suivante :

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh\left(\frac{1+6.25 IV - 13.1}{Q}\right) \right] .$$

Le dommage moyen  $\mu_D$  varie entre 0 (pas de dommage) et 5 (destruction) suivant l'échelle de dommages de 6 niveaux  $D_K$  donné par l'EMS 98. Une équivalence entre la valeur de la variable d'endommagement moyen  $\mu_D$  et les degrés de dommage de l'échelle EMS 98 est donnée par le Tableau I.5.

**Tableau I.6.** L'équivalence entre les niveaux de dommage moyen et les degrés de dommage de l'EMS-98

Niveau de dommage	Dommage moyen	Description du dommage
D0, D1	0-0.5	Pas de dommages à légers (Aucuns dégâts structuraux, dégâts non structuraux légers)
D2	0.5-1.5	Dommages moyens (Dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)
D3	1.5-2.5	Dommages sévères (Dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)
D4	2.5-3.5	Dommages très sévères (Destruction partielle)
D5	3.5-5	Destruction (Dégâts structuraux très importants)

En fonction de l'intensité sismique, l'indice de vulnérabilité permet de définir une courbe de vulnérabilité du bâtiment. Elle présente la relation entre la moyenne des dommages et l'intensité de l'aléa.

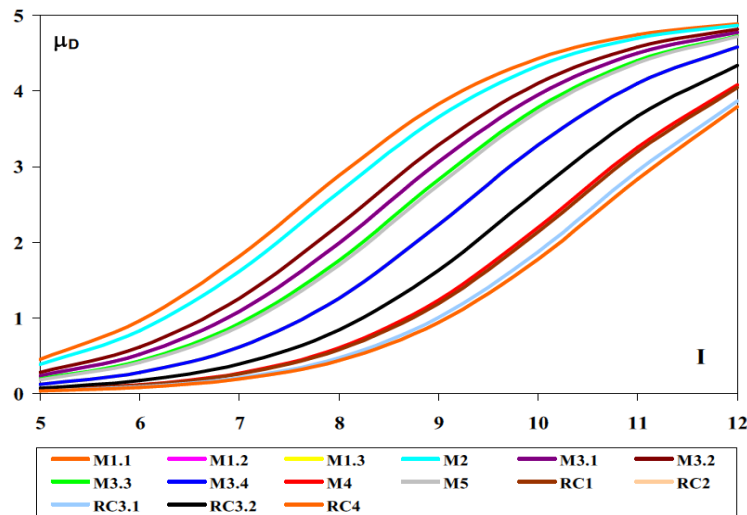


Figure I. 7. Fonctions de vulnérabilité semi-empiriques (Auclair,et al., 2007)

La Figure I.7 présente une courbe de vulnérabilité donnant le dommage sismique moyen  $\mu_D$  pour plusieurs typologies exprimées en termes d'intensité macrosismique EMS 98 et de l'indice de vulnérabilité IV caractérisant la qualité sismique du bâti.

La méthode Risk-UE utilise une distribution binomiale de dommage (Milutinovic, 2003 ; Lagomarsino and Giovinazzi, 2006) pour calculer la répartition des probabilités des dommages  $P_k$  pour chaque classe de dommage  $D_k$  ( $K=0$  à  $5$ ) pour un certain dommage moyen «  $\mu_D$  » selon l'équation donnée comme suit :

$$P(D_k) = \frac{5!}{k! (5 - k)!} \left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k}$$

Finalement, les principales remarques qu'on peut tirer concernant le programme Risk-UE sont :

- Le dommage moyen estimé résulte d'un processus d'inversion de la méthode d'enquête macrosismique EMS 98, selon laquelle est consigné l'essentiel du retour d'expérience européen ;
- La méthode Risk-UE qui définit une typologie plus détaillée que l'EMS98 ;
- La méthode Risk-UE est ainsi moins sensible que GNDT au contexte local, en plus cette méthode  $\Delta V_f$  qui permet de réduire l'intervalle d'incertitudes (BRGM, 2008).

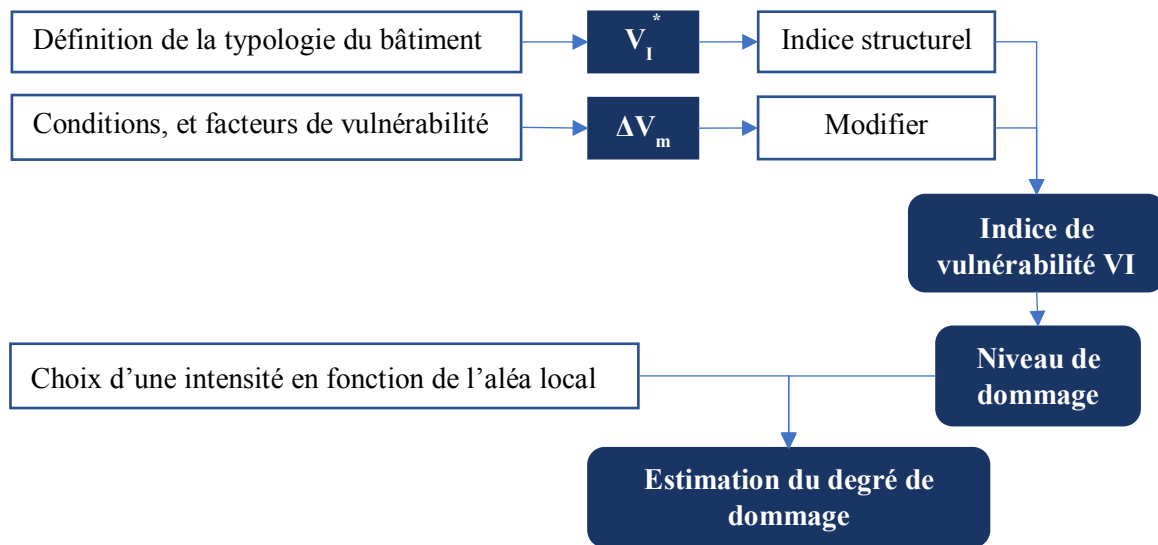


Figure I. 8.Procédure de la méthode Risk-UE

#### I.4.1.5. La méthode italienne (GNDT 1986)

Cette méthode a été développée dès 1984 par le GNDT italien, (créé par le conseil national de la recherche italien en 1983). La méthode a fait l’objet d’adaptations pour tenir compte des enseignements apportés par les tremblements de terre ultérieurs.

La méthode GNDT se résume en deux niveaux :

- **Le premier niveau :** Sorte de prélèvement d’une fiche de relevé spécifique pour tous les types de structure : données relatives à la fiche remplie, localisation du bâtiment, données métriques, âge de la structure etc. Ce sont des informations générales et assez facilement repérables sur la structure.
- **Le deuxième niveau :** Les informations nécessaires sont regroupées en 11 paramètres, (typologie et organisation du système résistant, qualité du système résistant, résistance conventionnelle, position du bâtiment et fondations, planchers, configuration en plan, configuration en élévation, éléments non structuraux et état du bâtiment) et deux distincts (rapport épaisseur/longueur et toiture pour les bâtiments en maçonnerie, nœuds-éléments critiques et éléments fragiles pour les bâtiments en béton armé).

La méthode revient au final avec 4 classes des vulnérabilités : A, B, C, D qui se résument dans le tableau suivant :

Tableau I.7.Les classes de vulnérabilité communes

Classe	A	B	C	D
Signification	Bonne résistance vis-à-vis le séisme : construction suivant les règles parasismiques	Classe intermédiaire : construction plus au moins vulnérable		Faible résistance : construction très vulnérable aux séismes

**Champ d'application**

La méthode développée par le GNDT s'applique sur toutes sorte de bâtiment, isolé ou un groupe de bâtis ou bien de villes, mais bien que la structure soit en maçonnerie ou en béton armée, les structures en bois et en taches métalliques ne sont pas concernées par cette méthode.

**Déroulement de la méthode**

L'indice de vulnérabilité (IV) représente "la qualité sismique" intrinsèque de la construction indépendamment du niveau d'aléa. Il est calculé par ces équations suivant la typologie de la structure :

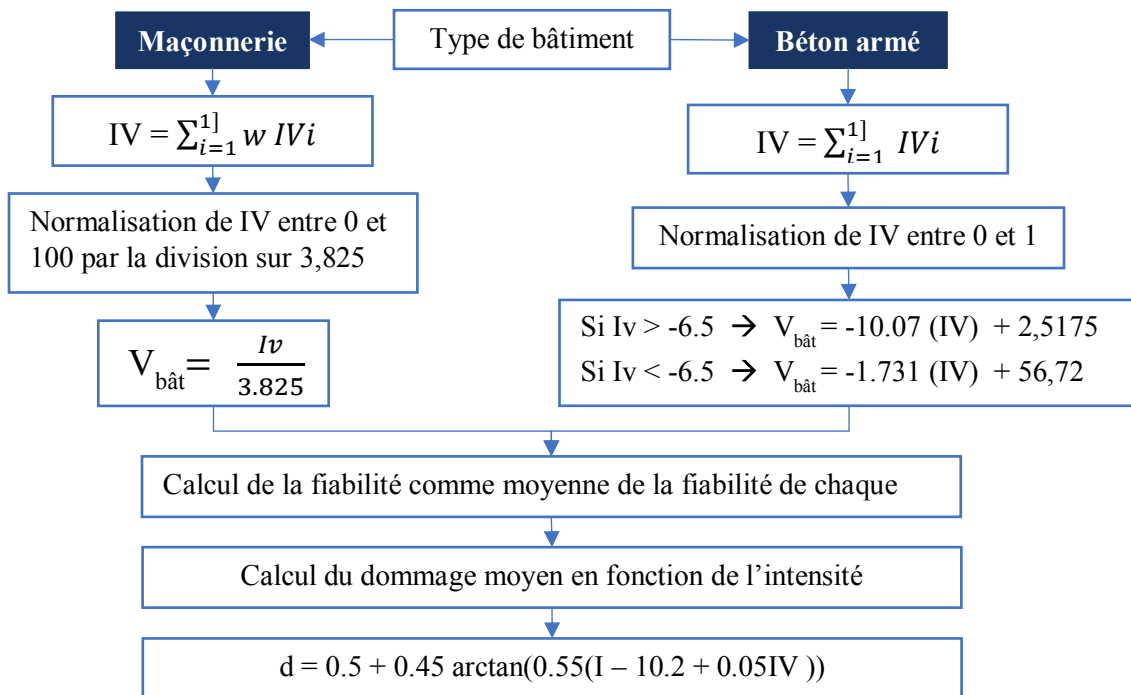


Figure I. 9. Procédures de calcul de l'indice de vulnérabilité IV selon le type de bâtiment

**Données et compétences nécessaires**

- **Le niveau 1 :** qui ne conduit pas à l'évaluation d'un indice de vulnérabilité, nécessite un examen visuel extérieur et intérieur du bâtiment. La visite de l'intérieur du bâtiment est rendue nécessaire par l'évaluation de la typologie des structures horizontales (nature des planchers), de la typologie des escaliers, de l'état de fonctionnement des installations etc. La collecte de données supplémentaires, hors visite de terrain, est nécessaire pour déterminer la classe d'âge du bâtiment, les différentes interventions ayant eu lieu sur le bâti (agrandissement, surélévation, restructuration...), l'utilisation du bâtiment etc. ;
- **Le niveau 2 :** suppose tout comme le niveau 1 un examen visuel extérieur et intérieur. La consultation de cartes géologiques ou la collecte de données géotechniques sont également requises pour estimer la nature du sol. Les plans du bâtiment facilitent la détermination des paramètres configuration en plan, configuration en élévation, Dmax

maçonnerie, nœuds, éléments critiques et éléments fragiles. Pour les bâtiments en béton armé, il est pratiquement indispensable que les plans soient reconstitués s'ils ne sont pas disponibles.

Et cela nécessite l'intervention d'un technicien spécialisé en bâtiment pour le niveau 1, plus la compétence et la maîtrise des règles parasismiques dans ce qui concerne le niveau 2.

### **Type de résultats obtenus**

La méthode de niveau 2 fournit trois types de résultats :

- Un indice de vulnérabilité ;
- Un niveau moyen de dommage en fonction de l'accélération maximale au sol ;
- Une répartition des probabilités de dommages ou une évaluation du pourcentage de bâtiments se trouvant dans un état de dommages  $k$  ;
- Une évaluation de la fiabilité du résultat obtenu.

Les dommages évalués sur une échelle de 0 à 1 peuvent être transcrits sur l'échelle EMS98 par application de l'équivalence suivante :

**Tableau I.8.** Les dommages selon l'échelle EMS-98

<b>Dommage d</b>	<b>EMS 98</b>
0	Pas de dommage
]0.0 ; 0.2]	Degré 1
]0.2 ; 0.4]	Degré 2
]0.4 ; 0.6]	Degré 3
]0.6 ; 0.8]	Degré 4
]0.8 ; 1.0]	Degré 5

#### **I.4.1.6. La méthode Japonaise**

Cette méthode a été créée en 1977 au Japon, pour rectifier la norme d'évaluation sismique des bâtiments existants. Elle était mise à jour en 1999 puis en 2001 suite à l'actualisation des développements scientifiques.

Dans cette méthode la performance sismique est représentée par un indice de performance sismique ( $I_s$ ) qui doit être calculé dans toutes directions de construction suivant les règles de l'art et parasismique suivant l'équation suivante :

$$I_s = E_0 \times S_d \times T$$

- $E_0$  : appelé indice structural de base, figure la performance nominale du bâtiment, supposé parfaitement régulier et en très bon état.
- $S_d$  : l'indice d'irrégularité du bâtiment, quantifie l'effet des diverses irrégularités structurales et géométriques sur le comportement de la structure.

- **T** : un indice de vieillissement relatif à la dégradation de la structure au cours du temps, est introduit pour tenir compte de l'influence de défauts structurels tels que la fissuration, les flèches, le vieillissement des matériaux...etc.

Après le calcul de l'indice de performance ( $I_s$ ), ce dernier doit être comparé par ce qu'on appelle : (indice de demande sismique  $I_{s0}$ ) obtenu par la formule suivante :

$$I_{s0} = E_s \times Z \times G \times U$$

- **$E_s$**  : est un coefficient qui vaut 0,8 pour le premier niveau et 0,6 pour les niveaux suivants ;
- **$Z$**  : caractérise le niveau d'aléa selon la localisation du bâtiment ;
- **$G$**  : est un paramètre de sol qui tient compte de l'interaction sol structure plus les effets topographiques ;
- **$U$**  : dépend de l'usage du bâtiment.

La comparaison fait naître 3 résultats résumés dans le tableau suivant :

**Tableau I.9.** Signification de la comparaison des indices

Comparaison	Signification
$I_s < I_{s0}$	Bâtiment résistant
$I_s = I_{s0}$	Bâtiment à grand risque de rupture
$I_s > I_{s0}$	Évaluation sismique incertaine, à refaire

#### **I.4.1.7. La méthode Grille Suisse**

La méthode a été établie en 2003 par L'Office Fédéral des eaux et de la Géologie suisse Afin de répondre à une décision du conseil fédéral exigeant de recenser les bâtiments de la confédération et d'en contrôler la tenue au séisme. La grille d'évaluation constitue l'outil de travail élaboré pour réaliser la première phase de cette méthode. Il s'agit d'un diagnostic sommaire de risque plus un indicateur économique relatif à la valeur d'assurance du bâtiment.

La méthode vise à recenser au moyen d'indicateurs les propriétés des ouvrages qui déterminent leur tenue au séisme et à évaluer le danger auquel sont exposés les bâtiments, les personnes et les biens. Une fiche d'inventaire consignait un schéma d'évaluation est fournie pour déterminer :

- L'indicateur **AZPS** : qui désigne l'ampleur des dommages corporels et des dégâts matériels, il est obtenu par la combinaison des différents indicateurs (ADS ; AIF ; ADP) ;
- L'indicateur **WZ** : qui témoigne de la probabilité d'effondrement de l'ouvrage, reflétant la probabilité d'effondrement combine l'aléa sismique par les indicateurs (WEP, WB).

Le produit des deux fournit l'indicateur de risque **RZPS**.

### **Champ d'application**

La méthode citée ci-dessus n'est qu'une première phase de la méthode globale qui est une procédure rapide et sommaire d'évaluation de risque. Les bâtiments avec un potentiel de risque jugé élevé sont sélectionnés pour l'étape 2 de la procédure suisse d'évaluation de la sécurité parasismique : ils doivent être analysés de manière plus détaillée à l'aide de questionnaires et de calculs d'ingénieur simples (OFEG, 2005b).

### **Données nécessaires**

L'analyse de l'étape 1 nécessite soit un examen visuel extérieur et intérieur, soit une consultation des plans si ceux-ci sont disponibles. La consultation des cartes géotechniques et géologiques, voire de données de sondages, est également requise pour caractériser le sol. Une fiche servant à la fois de fiche de relevé et de grille d'évaluation du risque est mise à disposition des enquêteurs.

#### **I.4.1.8. La méthode Néo-Zélandaise**

Cette méthode a été publiée par la New Zealand Society for Earthquake Engineering pour la première fois en 2000 (NZSEE, 2000), puis mise à jour en 2006. La méthode implique une estimation sommaire de la performance des bâtiments existants par rapport au standard exigé pour un nouveau bâtiment. Cette estimation, qui tient compte de toutes les informations raisonnablement disponibles, est donnée par le paramètre (pourcentage new buildings standard %NBS).

### **Données nécessaires**

Le diagnostic nécessite un examen visuel extérieur et intérieur plus la consultation des plans de structure pour identifier le système de fondations, etc. Des données géotechniques (cartes géologiques, données de sondages, étude géotechnique préalable à la construction, etc.) sont indispensables pour caractériser le sol de fondation.

### **Le type de résultats**

La note de performance attribuée au final au bâtiment (%NBS) tient compte de la vulnérabilité du bâtiment et du niveau d'aléa sismique auquel il est soumis.

### **Les étapes de calcul du %NBS**

- **La première étape :** de l'évaluation consiste dans le calcul du paramètre (%NBS)<sub>b</sub> (Baseline percentage new buildings standard). Ce paramètre exige la connaissance de plusieurs données :
  - La période fondamentale de vibration du bâtiment ;
  - La localisation ;
  - Le type de sol (classes A à E) ;

- La ductilité équivalente.
- **La deuxième étape** : consiste à identifier les faiblesses structurelles (« critical structural weakness ») susceptibles d'altérer le comportement du bâtiment. Les facteurs de vulnérabilité pris en compte se rapportent :
  - Aux irrégularités structurelles et/ou géométriques en plan et en élévation ;
  - À la présence de poteaux courts ;
  - Aux possibilités d'entrechoquement avec des structures voisines ;
  - À la susceptibilité du site aux effets induits (glissement, instabilité).

Due à chaque faiblesse structurale un coefficient apparaisse, entre 0 à 1, noté (PAR), le produit entre ce dernier et le paramètre (%NBS) mesure la réduction globale de performance attendue, par rapport à une structure bien conçue du même type, du fait de la présence de facteurs de vulnérabilité additionnels. On a donc finalement :

$$\%NBS = (\%NBS)_b \times PAR$$

On résume les résultats dans le tableau suivant :

**Tableau I.10.** Signification des résultats du %NBS

Résultat	Signification
%NBS < 33%	Le bâtiment est prédisposé à s'effondrer en cas de séisme : exigence de la mise en œuvre d'un diagnostic détaillé
33% < %NBS < 67%	Un diagnostic détaillé est recommandé
%NBS > 67%	Le bâtiment peut être considéré comme sûr

#### I.4.1.9. La méthode HAZUS

HAZUS (Hazard US) est une méthodologie développée par le NIBS (National Institute of Building Science) et supportée par la FEMA (Fédéral Emergency Management Agency), La méthodologie fut implémentée sous forme de logiciel interactif public. On fait remarquer que l'EMS-98 fournit des courbes de fragilité donnant le niveau d'endommagement en fonction de l'intensité macrosismique. Cependant, la méthodologie conserve une certaine dépendance par rapport aux jugements des ingénieurs et des opinions des experts dans l'estimation des degrés de dégâts. On met la lumière sur une caractéristique principale qui est : l'accélération ou le déplacement spectraux pour quantifier l'intensité sismique. Ces paramètres sont représentés par le spectre de réponse ou par le PGA. Ces données sont associées à un niveau d'endommagement, défini et décrit pour chaque type d'enjeux considéré.

Les critères décrits par cette méthode ne se résument en 3 points essentiels :

- Les typologies de bâtiments ;
- La définition des dommages ;

- Le calcul de la probabilité de dommage par une méthode analytique.

En considérant les courbes de fragilité représentée par l'EMS, l'Indépendance de la méthode exige la fourniture de ses propres courbes de fragilité correspondantes à une typologie de bâtiments, et pour plusieurs niveaux de dommages.

### **Le déroulement de la méthode**

Le programme se caractérise par une structuration modulaire et multi-niveaux d'analyse. Il présente les caractéristiques suivantes :

- Le programme présente six modules indépendants : l'inventaire des enjeux, l'analyse de l'aléa, l'estimation de dommages directs, l'estimation de dommages indirects, pertes Economiques directes et indirectes ;
- Les résultats sont représentés sous forme d'une carte intégrée dans un SIG ;
- Le logiciel permet trois niveaux d'analyse : le premier niveau basé sur les données initialement insérée dans la base de données du programme, le deuxième niveau basé sur les données insérées par l'utilisateur, et le troisième niveau basé sur des données complémentaires relatives aux inventaires, aux paramètres techniques de construction ainsi qu'aux coûts économiques ;
- Le module des enjeux définit quatre types d'enjeux : le bâti courant, les constructions spéciales, les infrastructures de transport et les réseaux d'eau, d'énergie et de communication. Pour le bâti courant, il définit 38 typologies des constructions sur la base de leur système structural et de leur hauteur.

### **Typologie des bâtiments**

On considère 36 types de bâtiments, définis par leurs matériaux de construction du système porteur définissant le comportement général de la structure et du nombre d'étages. Ainsi 16 systèmes structurels sont définis :

- W1, W2 : pour les bâtiments en bois ;
- S1 à S5 : pour les bâtiments en acier ;
- C1 à C3 : pour les bâtiments en béton ;
- PC1 et PC2 : pour les bâtiments composés d'éléments en béton préfabriqué ;
- RM1 et RM2 : pour les bâtiments en maçonnerie renforcée ;
- URM pour les bâtiments en maçonnerie non renforcée et MH pour la classe particulière des mobil-homes.

### **Définition des dommages**

Dans la méthodologie HAZUS, quatre niveaux de dommages sont définis :

- Niveau de dommage « léger » : apparition de fines fissures près des liaisons ou au sein des liaisons ;
- Niveau de dommage « modéré » : la plupart des murs présentent des fissures diagonales ; certains murs présentent également des fissures plus grandes avec effritement du béton aux extrémités, indiquant que la limite élastique a été atteinte ;

- Niveau de dommage « important » : pour la plupart des murs, la limite d'élasticité a été atteinte ; certains murs ont dépassé leur capacité ultime, présentant de larges fissures traversantes et un effritement important le long des fissures. Un effondrement partiel peut se produire en raison de la défaillance des colonnes non ductiles qui ne sont pas conçues pour résister à des charges latérales ;
- Niveau de dommage « ruine » : la structure s'est effondrée, ou est sur le point de s'effondrer à cause de la défaillance de la plupart des murs et de la défaillance de certaines poutres ou colonnes critiques. Environ 13 % (low-rise), 10 % (mid-rise) ou 5 % (high-rise) de la superficie totale des bâtiments C2 est prévue de s'effondrer.

La déformation inter-étage  $ISD_i$  est définie par la relation suivante :

$$\forall i \in [0, N] ISD_i(t) = \frac{U^{(i+1)}(t) - U^{(i)}(t)}{x^{(i+1)} - x^i}$$

Avec :  $U_i$  et  $x_i$  respectivement le déplacement horizontal et la position de l'étage  $i$ .

## I.4.2. Les méthodes mécaniques

### I.4.2.1. Courbes de capacité

Pour l'analyse de la vulnérabilité sismique et le dimensionnement parasismique, il est nécessaire de définir l'état d'une structure (niveau de performance) lors de sa sollicitation par un séisme (Nazé et al., 2006). Des niveaux de performance détaillés sont définis par les différentes méthodes utilisant ce concept comme la FEMA. Cette dernière définit 4 niveaux de performance et des états de dommage limites correspondants (FEMA, 2000) :

Opérationnel (léger) ; occupation immédiate IO (modéré) ; sécurité des personnes LS (important) ; non-effondrement CP (très important pouvant aller jusqu'à la ruine). Ces niveaux de performance sont repris dans la méthode RISK-UE (2003) LM2, et différent de ceux de la méthode Risk-UE LM1 qui est fondée sur l'EMS-98.

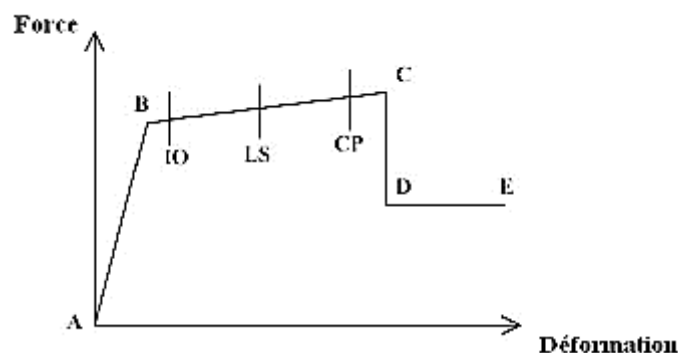


Figure I. 10. Loi de comportement et niveaux de dommage (FEMA, 2000)

Pour estimer le niveau de performance atteint pour un mouvement sismique donné, il est nécessaire de superposer, dans le plan des accélérations spectrales en fonction des déplacements spectraux ( $S_a$ ,  $S_d$ ), la courbe de comportement de la structure (courbe de capacité) et la courbe de sollicitation du séisme (spectre de réponse au format ADRS).

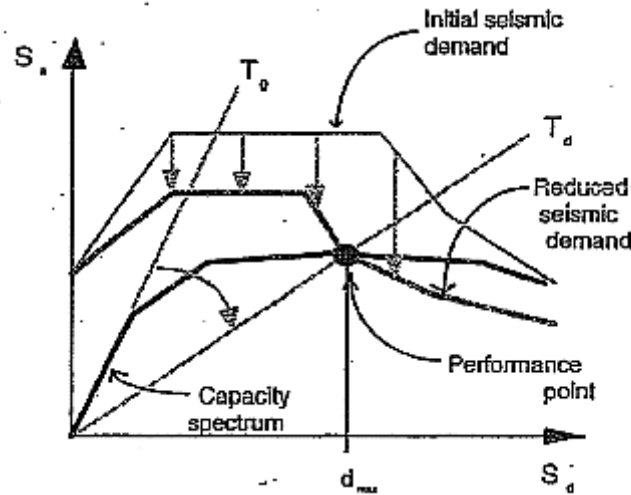


Figure I. 11. Courbe de capacité, demande sismique, point de performance (ATC40)

La courbe de capacité, qui relie l'accélération (effort tranchant  $v$ ) aux déplacements (par exemple du toit de la structure  $d$ ), peut être obtenue par un calcul statique équivalent dit en 'poussée progressive' (Pushover) par modélisation numérique (Chopra et Goel, 1999). La courbe de capacité est représentée dans le plan ( $S_d$ ,  $S_a$ ), avec  $S_d$  le maximum en déplacement de la réponse du modèle à un degré de liberté équivalent au premier mode de la structure et  $S_a$  le maximum en accélération de la réponse de ce même modèle.

Cette transformation s'effectue en multipliant l'effort tranchant et le déplacement respectivement par les rapports  $1/\alpha_1 W$  et  $1/P_{f1} \phi_1$ . Rappelons que  $\alpha_1$ ,  $W$ ,  $P_{f1}$ ,  $\phi_1$  sont respectivement le pourcentage de participation modale, la masse sismique de la structure, le facteur de participation modal du mode fondamental et l'amplitude de ce mode.

Pour Risk-UE, comme pour HAZUS, les courbes de capacité sont bilinéaires : la première droite représente la partie élastique jusqu'au point de plastification (yield point), la deuxième, de pente plus faible, représente le comportement ductile jusqu'à la ruine (ultimate point).

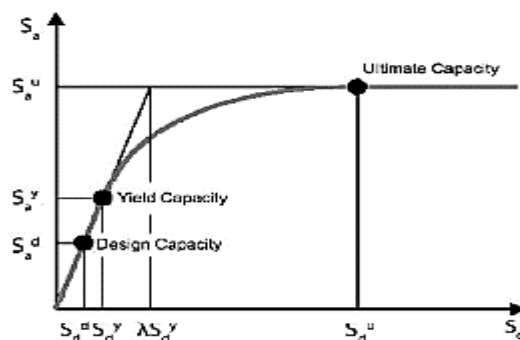


Figure I. 12. Courbe de capacité d'un bâtiment dans le format (Accélération spectrale- Déplacement spectral) (Risk-UE, 2003)

Si la structure réagit de manière élastique au séisme choisi, les deux courbes se coupent dans la partie linéaire de la courbe de capacité en un point appelé point de performance. Si l'endommagement a commencé, le point de performance est obtenu différemment selon la méthode utilisée (méthode en ductilité ou en amortissement). La valeur en déplacement du point de performance indique l'état de la structure, c'est-à-dire son niveau de performance ou encore son niveau d'endommagement.

#### I.4.2.2. Courbes de fragilité

La méthode en capacité est déterministe. La réponse de la structure sous séisme n'est évidemment pas totalement représentée par le spectre de réponse à la première fréquence propre de la structure. Un autre concept a donc été développé : la fragilité (FEMA, 1999 ; Risk-UE, 2003). Cette méthode consiste à représenter les frontières des niveaux de performance de manière probabiliste en fonction d'un paramètre représentant l'agression sismique (PGA, IEMS98,  $S_d$ ). À un niveau de sollicitation donné, quatre courbes donnent la probabilité de dépasser chaque niveau de dommages défini précédemment (Léger, Modéré, Important ou Ruine).

Les courbes de fragilité sont des fonctions log-normales, qui décrivent la probabilité d'atteindre ou de dépasser un niveau de dommages structurels, pour un déplacement ou une accélération donnée. Ces courbes ont été mises au point à partir d'extrapolation des données liées aux dommages observés par des experts ainsi que des tests au laboratoire. Pour chaque valeur donnée de la réponse spectrale, la probabilité d'avoir un état de dommages discret est calculée comme étant la différence des probabilités cumulées d'atteindre, ou de dépasser, des états de dommages successifs. Chaque courbe de fragilité de type log-normale est définie par une valeur médiane de la demande sismique (déplacement spectral, accélération spectrale) qui correspond à l'atteinte d'un état d'endommagement ds et par l'écart type associé à cet état de dommage.

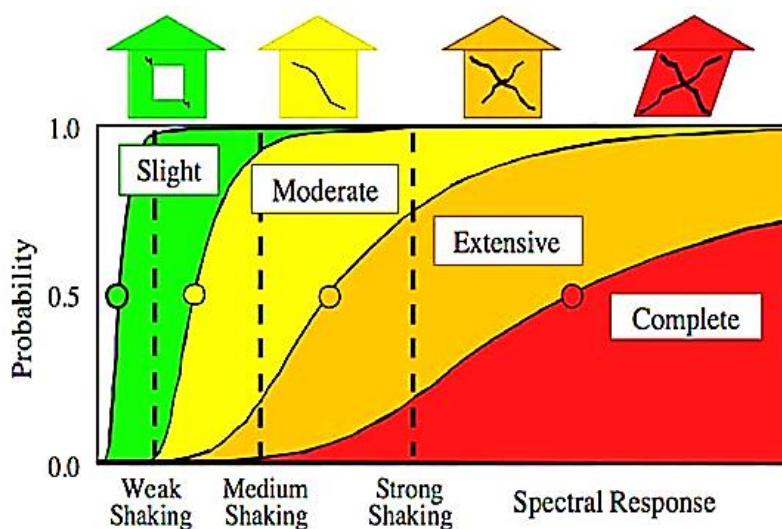


Figure I. 13. Courbes de fragilités pour les niveaux de dommages « léger, modéré, important ou ruine » (FEMA, 2003 ; Michel, 2007)

Un état de dommage discret, est calculé comme étant la différence des probabilités cumulées d'atteindre, ou de dépasser, des états de dommages successifs. Chaque courbe de fragilité, de type log-normale, est défini par une valeur médiane de la demande sismique  $S_{d,ds}$  (déplacement spectral, accélération spectrale) qui correspond à l'atteinte d'un état d'endommagement  $ds$  et par l'écart type  $\beta_{ds}$  associé à cet état de dommage.

La probabilité d'atteindre ou de dépasser un niveau d'endommagement  $ds$ , pour une demande sismique  $S_d$  est donnée par :

$$P(ds/S_d) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{S_d}{S_{d,ds}} \right) \right]$$

- $\Phi$  : la distribution normale cumulée ;
- $S_{d,ds}$  : la valeur moyenne du déplacement  $d$  pour le niveau d'endommagement  $ds$  ;
- $B_{ds}$  : l'écart type du déplacement pour le niveau d'endommagement  $ds$ .
- 

### **1.4.3. La méthode de push-over**

La méthode de calcul la plus rigoureuse d'analyse des structures sous l'action sismique est le calcul dynamique temporel non linéaire qui permet de reproduire fidèlement le comportement de la structure et de connaître ses états de performance à différents instants du séisme.

Néanmoins, ce type d'étude est difficilement envisageable pour des structures courantes en raison de la complexité des modèles utilisés qui nécessitent des moyens de calcul relativement lourds, et le calcul non linéaire en poussée progressif représente une alternative intéressante

La méthode PUSHOVER consiste à établir une courbe effort-déplacement unique pour caractériser le comportement de la structure en "la poussant" de plus en plus fort. L'analyse 'push over' est une procédure statique non linéaire dans laquelle les charges verticales restent constantes et les efforts horizontaux, appliqués au niveau de la masse de la structure pour reproduire les forces d'inertie représentative de l'action sismique, ont une répartition généralement semblable à celle des déplacements du mode fondamental de vibration. Ces déplacements sont multipliés par un coefficient croissant jusqu'à l'obtention d'un état d'endommagement plastique limite. Cette courbe, tracée en portant en abscisses le déplacement  $\Delta$  du sommet et en ordonnée l'effort tranchant  $V$  à la base, fournit une estimation des mécanismes de plastification attendus et de l'endommagement progressif, en fonction de l'intensité des forces et des déplacements horizontaux.

La courbe d'un « Pushover » peut s'obtenir à partir d'un calcul non linéaire statique avec un modèle éléments finis. Ces calculs sont parfois difficiles à réaliser en raison des problèmes en convergence ainsi que la lourdeur des modèles.

La méthode de calcul la plus rigoureuse d'analyse des structures sous l'action sismique est le calcul dynamique temporel non linéaire qui permet de reproduire fidèlement le comportement de la structure et de connaître ses états de performance à différents instants du séisme.

Néanmoins, ce type d'étude est difficilement envisageable pour des structures courantes en raison de la complexité des modèles utilisés qui nécessitent des moyens de calcul relativement lourds ; et le calcul non linéaire en poussée progressif représente une alternative intéressante.

#### I.4.4. La méthode CTC

La méthode CTC « fiche d'évaluation des dommages » est une méthode généralement utilisée en Algérie, après une catastrophe naturelle.

La fiche d'évaluation des dommages de la méthode CTC comporte :

- Des renseignements d'ordre général d'identification, usage, nombre de niveau ;
- Des observations concernant les problèmes de sol, fondations et infrastructure ;
- Une évaluation des dommages subis par les éléments structurels et secondaires ;
- Des commentaires sur les causes probables des dommages ;
- Des recommandations de mesures d'urgence.

Pour l'évaluation du niveau de dommage des éléments de construction ou de la construction toute entière une classification à 5 Niveau est utilisée (Tableau I.10).

Tableau I.11. Tableau de dommages suivant la méthode CTC

Niveau	Couleur	Dommages	Description
1	Vert	Pas de dommages	A l'exception des meubles et de glaces cassées.
2	Vert	Dommages légers	Fissures des cloisons intérieurs ou des plafonds, dommages pour canalisation d'eau, dommages non structurel isolés.
3	Orange	Dommages modérés	Dommages importants pour les parties non structurelles
4	Orange	Dommages importants	Dommages non structuraux très importants et dommages structuraux considérables. Fissures en X dans les voiles de contreventement, éclatement des nœuds « poutres-poteaux »
5	Rouge	Dommages très importants	Bâtiment à condamner ou effondrés

### I.5 Synthèse

L'objectif de cette comparaison est de nous permettre de sélectionner une méthode qui nous permettra de répondre à nos exigences particulières. Il ne s'agit pas de définir si une méthode est meilleure qu'une autre dans l'absolu mais de guider un choix de méthode en fonction du contexte en Algérie, d'objectifs et d'attentes précises.

La mise en parallèle des bandeaux d’analyse des critères caractérisant chaque méthode sous forme d’un tableau permet une meilleure lecture comparative simple et rapide de l’ensemble des méthodes analysées.

Pour une meilleure lecture, les critères analysés ont été regroupés en quatre catégories : les caractéristiques générales ; la complexité ; les moyens nécessaires à la réalisation du diagnostic et les résultats obtenus.

On opte également, dans le but de faciliter la lecture, pour une trame de fond plus ou moins foncée des cellules en fonction du nombre d’étoiles qu’elles possèdent. Plus la cellule a d’étoiles, plus la caractérisation du critère est positive et plus sa trame de fond est sombre.

**Tableau I.12.** Tableau comparatif des méthodes étudiées

Méthode	Caractéristique générales		Complexité	Moyens	Résultats
	Champ D’application	Typologies de bâtiments	Simplicité	Temps Nécessaires	Type de résultat obtenu
RISK-EU	** B et U	***	**	**	*** I, D et M
Vulneralp	* U	***	***	***	*** I, D et M
Néo-zélandaise	** B et U	***	**	**	* I
Grille suisse	** B et U	***	***	**	* I
FEMA 154	* U	**	***	***	** I et D
Japonaise	* B	*	**	*	* I
GNDT	** B et U	**	**	*	** I et D

- B= à l’échelle du bâtiment, U= à l’échelle urbaine ;
- I= indice de vulnérabilité, D= résultat en termes de dommages ;
- M= marges d’erreurs.

## Partie 02

# Les méthodes multi critères d'aide à la décision – MMAD

---

### I.6 Introduction

L'aide multicritère à la décision est un nouveau monde de concepts, d'approches, de modèles et de méthodes qui visent à aider le gestionnaire (le décideur) à décrire, évaluer, ranger, choisir ou rejeter un ensemble d'actions, pouvant être exercées sur des candidats, des produits ou des projets.

Philippe Vincke a défini l'aide multicritère ainsi : "L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision à plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte (Serge Bellut, 2002).

Pour Bouyssou, l'argument réaliste selon lequel la réalité étant multidimensionnelle, il est naturel que l'on prenne en compte plusieurs points de vue pour aider à la décision et donc qu'on utilise des méthodes multicritères, ne peut à lui seul justifier d'adopter une démarche multicritère pour aider à la décision. Utiliser un tel argument conduirait à voir le monocritère comme un cas limite et dégénéré du multicritère (Simon, 1982).

L'aide multicritère à la décision œuvre à apporter un éclairage et des explications à une catégorie de problèmes où :

- Plusieurs critères quantitatifs et qualitatifs sont pris en considération ; - Ces critères sont souvent hétérogènes ;
- Ces critères sont généralement conflictuels ; - Ces critères sont généralement considérés d'inégale importance (Simon, 1983).

### I.7 Analyses multicritères

Nous nous sommes plus spécifiquement intéressés à l'aide multicritères à la décision, qui consiste à ordonner les alternatives sur la base soit d'un critère unique, soit de différents critères appréhendés dans leur pluralité (approche multicritères) ; le tout en vue de faire ressortir l'alternative qui s'approche le plus des objectifs recherchés. Cette démarche nécessite tout d'abord de reconnaître les acteurs, puis de définir les alternatives d'un projet, d'établir les critères et leur pondération éventuelle. Ensuite, il faut évaluer chaque critère pour chaque alternative et

l'ensemble des résultats est inscrit dans une matrice alternatives/critères. Cette matrice sera interprétée en vue d'obtenir un classement des différentes alternatives et d'identifier celle qui satisfait au mieux les exigences requises.

### **I.7.1. Difficulté d'un problème multicritère**

La plupart des décisions qui font l'objet d'études multicritères sont de nature complexe et leurs conséquences sont importantes et stratégiques. L'aspect conflictuel des critères, l'indétermination et le manque d'information liés au problème sont souvent avancés comme les sources de sa complexité (Chakhar,2006).

La principale difficulté d'un problème multicritère est qu'il s'agit d'un problème mathématiquement mal posé. C'est-à-dire sans solution objective. Il n'existe pas, en général, d'action meilleure que toutes les autres simultanément pour les critères, le concept de solution optimale n'a donc pas de sens dans un contexte multicritère. De même, un problème de rangement n'aura une solution objective que si tous les critères donnent le même rangement, ce qui est tout à fait exceptionnel. « Résoudre » un problème de décision multicritère ne consiste donc pas à rechercher une sorte de vérité cachée (alors que c'est le cas dans un problème d'optimisation classique), mais à aider le décideur à maîtriser les données (souvent complexes) de son problème et à progresser vers une solution. Celle-ci sera donc plutôt une action de compromis et il faut accepter qu'elle dépende fortement de la personnalité du décideur, des circonstances dans lesquelles se fait l'aide à la décision, de façon dont on formule le problème et de la méthode d'aide à la décision qui est utilisée. Ces caractéristiques sont évidemment gênantes pour des scientifiques habitués à résoudre des problèmes dont la solution existe indépendamment d'eux (Vincke, 89).

### **I.7.2. Nature des problèmes multicritères**

Les problèmes multicritères sont généralement classifiés selon (Othmani, 1998) :

- La nature des conséquences des décisions qui sont modélisées comme :
  - Déterministes, stochastique ou floues,
  - Réversibles, lourdes, ou irréversibles.
- La nature de l'ensemble des alternatives qui sont modélisées :
  - Explicite avec un nombre d'alternatives fini,
  - Implicite avec un nombre d'alternatives infini.
- Le contexte dans lequel la décision est prise : décision publique ou privée ;
- Le nombre de décideurs : décision de groupe ou individuelle.

L'ensemble des méthodes et des modèles développés en analyse multicritère ont un but commun qui vise à aider le décideur à prendre une décision qui le satisfait, et ce, au meilleur de sa connaissance vis-à-vis de la situation décisionnelle à laquelle il fait face. En ce sens, il s'agit de

la meilleure solution qu'il peut trouver en utilisant un outil opérationnel tel qu'un modèle ou une méthode. Ce processus d'aide à la décision vise à intégrer le décideur dans la démarche décisionnelle en lui offrant la possibilité de progresser vers une solution. Celle-ci dépendra de plusieurs facteurs, qui sont de nature subjective, tel que : la personnalité du décideur, les circonstances entourant l'activité décisionnelle, la façon dont le problème a été formulé et la méthode d'aide à la décision utilisée [Vincke, 89].

En général et dans le contexte de l'ensemble A des actions potentielles, le problème de décision multicritère consiste à choisir une « meilleur » action (problème de choix) ou à trier les actions en vue d'une classification suivant des normes préétablies (problématique de rangement).

### I.7.3. Le critère

Un critère est une fonction  $g$ , définie sur l'ensemble des actions A, qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné, et qui représente les préférences de l'utilisateur selon un point de vue (Vincke, 1989).

En d'autres termes, un critère est une fonction à valeurs réelles définie sur l'ensemble des actions potentielles afin de pouvoir décrire le résultat de la comparaison de deux actions a et b et de fonder la proposition :

$$f_b \geq f_a \rightarrow bS_f a$$

Où  $S_f$  est une relation binaire signifiant "au moins aussi bon que", relativement au critère f.

## I.8 Les méthodes multicritères d'aide à la décision (MADM)

Au cours du processus d'évaluation d'un projet, elles permettent de prendre les décisions concernant par exemple la localisation, des options de construction ou encore l'échéancier du projet (Roy et Bouyssou, 1993). Ces méthodes permettent également de prendre la décision finale lors de choix de différentes alternatives. Plusieurs méthodes d'aide à la décision existent : la présentation de l'information en tableau, la comparaison par critères, la méthode ordinale et l'aide multicritères à la décision.

L'intérêt des méthodes d'aide à la décision est justifié dans le cas où la recherche de la solution n'est pas immédiate. Pour illustrer cela, Brunner et Starkl (2004) ont pris comme exemple une problématique idéale dans laquelle on recherche une solution optimisant les impacts  $x$  et les coûts  $y$ , cet exemple est présenté Figure I.14.

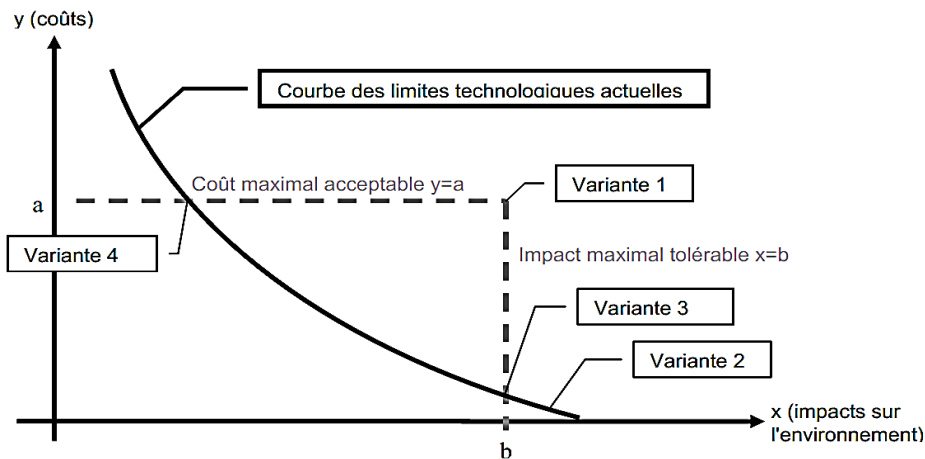


Figure I. 14. Recherche de la solution optimum (Brunner et Starkl 2004)

Parmi les méthodes d'aide à la décision, on peut citer les tableurs SMART et SWING, basés sur la théorie MAUT (Brunner et Starkl 2004) et le logiciel Expert Choice (Al-Harbi 2001) appliquant le processus de hiérarchisation analytique (AHP). "La diversité de ces méthodes réside dans la façon d'effectuer la synthèse de l'information" (Ben Mena 2000). En effet, l'exhaustivité sur le nombre des MMAD est difficile à cerner, néanmoins, nous avons essayé de regrouper les principales méthodes dans le Tableau I.12 ci-dessous.

Tableau I.13. Les méthodes multicritères d'aide à la décision

Groupe	Méthode	Référence
Méthodes de notation	Simple additive weighting (SAW)	(Sustainability 2016, 8, 1295)
	Complex proportional assessment (COPRAS)	
Méthodes basées sur la distance	Goal programming (GP)	
	Compromise programming (CP)	
	Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)	
	Multicriteria optimization and compromise solution (VIKOR)	
Méthodes par paires de comparaison	Data envelopment analysis (DEA)	
	Analytic hierarchy process (AHP)	
	Analytic network process (ANP)	
Méthodes de sur-classement	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH)	
	Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE)	
Méthodes utilitaires/évaluation	Elimination and choice expressing reality (ELECTRE)	
	Multi-attribute utility theory (MAUT)	
Méthodes de vulnérabilité sociale	Multi-attribute value theory (MAVT)	
	Méthode d'évaluation spatio-temporelle (MOVISS)	/
	Analyse multicritère spatial (SEVI) et Indice de vulnérabilité sociale (SoVI)	
Modèle artificielle de réseau neuronal (ANN)		

### I.8.1. Simple additive weighting (SAW)

La méthode SAW (pondération additive simple) est une des plus méthodes multicritères d'évaluation largement utilisée en pratique en raison de sa simplicité. Elle démontre clairement l'idée intégrant les valeurs et les poids des critères en une seule estimation de la valeur du critère, cependant un score est calculé pour chaque alternative en multipliant la valeur pesée donnée à l'alternative de cet attribut avec les poids d'importance relative assignés directement par les décideurs suivis en additionnant des produits pour tous les critères (Ms.Eln Hadjadj et Abdi).

#### Déroulement de la méthode

- **Étape 1** : calculer la matrice normalisées  $r_{ij}$  ;
- **Étape 2** : calculer  $A_i$  :

$$A_i = \sum_{j=1}^m W_j r_{ij} \quad \text{Avec } j = \overline{1, n}$$

- **Étape 3** : classement des alternatives selon l'ordre décroissant des  $A_i$ .

### I.8.2. Complex proportional assessment (COPRAS)

COPRAS est une autre méthode MCDM qui sélectionne la meilleure alternative parmi beaucoup d'alternatives réalisables en déterminant une solution avec rapport direct et proportionnel à la meilleure solution au rapport avec la solution idéale-pire. La méthode COPRAS a été appliquée dans le système d'information géographique, l'évaluation du cycle de vie du bâtiment et le problème de sélection des matériaux (Zavadskas, 2007 ; Banaitiene, 2008 ; Chatterjee, 2011).

#### Déroulement de la méthode

Pour résoudre un problème MCDM par COPRAS, après avoir déterminé les alternatives et les critères associés il faut suivre les étapes suivantes :

- **Étape 1** : Normaliser la matrice de décision : supposons que la matrice de décision de l'alternative soit sous le critère d'évaluation ;
- **Étape 2** : Calculer la matrice de décision normalisée pondérée où figure le poids des critères ;
- **Étape 3** : Calculer la matrice de décision normalisée pondérée ( $P_j$ ) où figure le poids des critères ;
- **Étape 4** : Obtenir les sommes des valeurs de critères normalisées pondérées ( $R_j$ ) pour chaque variante dont les valeurs plus petites sont préférables ;
- **Étape 5** : Identifier le poids relatif de chaque alternative  $Q_j$  ;

- **Étape 6 :** Déterminer la priorité des alternatives en fonction des valeurs de  $Q_j$ . Plus la valeur de  $Q_j$  est élevée, plus l'alternative est mieux classée dans le classement final.

### I.8.3. Goal programming (GP)

Le Goal Programming développée par (Charnes et al 1961), compte parmi les modèles de la programmation mathématique à objectifs multiples les plus connus. Ce modèle permet de tenir compte simultanément de plusieurs objectifs dans une problématique de choix de l'action la plus satisfaisante, parmi un ensemble d'actions potentielles (ou l'ensemble des solutions admissibles) (Chang, 2007).

Plus précisément, ce modèle consiste à trouver une solution qui minimise les déviations par rapport aux buts fixés par le décideur pour chaque objectif. Ces déviations peuvent être positives, dans le cas du dépassement du but, ou négatives, dans le cas contraire. De plus, le décideur peut attribuer une importance relative aux différents types de déviations (écarts). La procédure d'agrégation des degrés d'atteinte de ces divers objectifs conflictuels, auxquels sont rattachées des unités de mesure de nature généralement différente, soulève quelques difficultés (Aouni et al 2001).

La formulation du modèle standard du Goal Programming est comme suit :

$$\begin{aligned} & \underset{x \in A}{\text{MIN}} \sum_{i=1}^p (\delta^+_i + \delta^-_i) \\ & \text{Sujet à : } C_1(\underline{x}) \leq 0, \quad l = 1, 2, \dots, L \\ & g_i(\underline{x}) - \delta^+_i + \delta^-_i = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & \delta^+_i, \delta^-_i \geq 0 \end{aligned}$$

Avec :

- $\delta^+_i$ : l'écart positif de par rapport au but ;
- $\delta^-_i$ : L'écart négatif de par rapport au but ;
- $g_i(\underline{x})$ : L'évaluation de la solution  $x$  par rapport au critère  $i$  ;
- $C_1(\underline{x})$ : Système de contrainte relative au problème.

Le produit des écarts positifs et négatifs est toujours nul, car les vecteurs et ne peuvent être actifs (c'est-à-dire une solution de base) simultanément. En d'autres termes, pour un objectif  $i$  quelconque, nous ne pouvons être en même temps en dessous ( $\delta^-_i$ ) et en dessus ( $\delta^+_i$ ) du but fixé (Jahanshahloo et al., 2008).

Dans le Goal Programming standard, le décideur est principalement appelé à fixer des buts pour les objectifs qu'il a préalablement déterminés. Son implication dans le processus décisionnel s'arrête en général à ce stade.

Le modèle du Goal Programming a connu plusieurs variantes. A titre d'indications, nous citons : le GP pondéré, le GP lexicographique, le GP minimax, le GP non linéaire, le GP incluant des fonctions de satisfaction, le GP avec intervalles, le GP flou, le GP interactif (Kettani et al., 2004).

#### I.8.4. Compromise programming (CP)

La technique compromise programming (CP) développée par Zeleny en 1973 (Dyer et al. 1979) s'articule autour d'une optique de minimisation des écarts par rapport à la solution idéale tout en procédant à une articulation a priori des préférences ( $\alpha_j$ ). Sa formulation algébrique est la suivante :

$$\underset{x \in A}{MIN} \left[ \sum_{j=1}^n \alpha_j^r \left[ \frac{g_j(\underline{x^*}) - g_j(x)}{g_j(\underline{x^*}) - g_j(\underline{x^*})} \right]^r \right]^{1/r}$$

Avec :

- $g_j(\underline{x^*})$  : est l'évaluation de la meilleure des solutions sur le critère j ;
- $g_j(\underline{x^*})$  : est l'évaluation de la pire des solutions sur le critère j.

Par sa définition, la fonction objective de la technique de compromise programming n'exige pas de normalisation des évaluations. En effet, les évaluations sont d'une certaine façon normalisée puisque la performance d'une action par rapport à un critère est divisée par le terme  $g_j(\underline{x^*}) - g_j(\underline{x^*})$ , et par conséquent le terme  $\frac{g_j(\underline{x^*}) - g_j(x)}{g_j(\underline{x^*}) - g_j(\underline{x^*})}$  n'a pas d'unité (Andre et al 2007).

#### I.8.5. Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

La méthode TOPSIS est proposée par (Yoon et Hwang, 1981). L'objectif de cette méthode est de choisir une alternative, parmi un ensemble d'alternatives, qui a d'une part, la plus courte distance à l'alternative idéale (la meilleure alternative sur tous les critères), et, d'autre part, qui a la plus grande distance à l'alternative négative idéale (celle qui dégrade tous les critères). Pour cela, la méthode TOPSIS vise, dans un premier temps, à réduire le nombre de scénarios de désambiguïsation en écartant les scénarios dominés et, en deuxième temps, à classer les scénarios efficaces selon leurs scores globaux calculés.

#### Déroulement de la méthode

- **Étape 1** : normaliser les performances ;

$$E_j = \frac{g(j)a(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [g(j)a(i)]^2}} ; i = 1, 2, \dots, m; \text{ et } j = 1, 2, \dots, n.$$

- **Étape 2** : calculer le produit des performances normalisées par les coefficients d'importance relative aux attributs ;

$$e''_{ij} = \pi_j * e'_{ij} ; i = 1, 2, \dots, m ; \text{ et } j = 1, 2, \dots, n$$

- **Étape 3** : déterminer les profils idéal ( $a^*$ ) et anti-idéal ( $a^*$ ) ;

$$- a^* = \{ \max \{ e''_{ij} \}, i = 1, 2, \dots, m; \text{ et } j = 1, 2, \dots, n \}; \quad e_j^* = \max \{ e''_{ij} \}$$

$$a^* = \{ e_j^*, j = 1, 2, \dots, n \}$$

$$- a^* = \{ \min \{ e''_{ij} \}, i = 1, 2, \dots, m; \text{ et } j = 1, 2, \dots, n \}; \quad e_j^* = \min \{ e''_{ij} \}$$

$$a^* = \{ e_j^*, j = 1, 2, \dots, n \}$$

- **Étape 4** : calculer la distance euclidienne par rapport aux profils ( $a^*$ ) et ( $a^*$ ) ;
- **Étape 5** : calculer un coefficient de mesure du rapprochement au profil idéal ( $C_i^*$ ) ;
- **Étape 6** : ranger les actions en fonction des valeurs décroissantes de  $C^*$ .

### I.8.6. Multicriteria optimization and compromise solution (VIKOR)

La méthode VIKOR présente une approche adoptée du problème MADM pour l'optimisation des attributs de qualité divers en déterminant la meilleure alternative. Cette approche est basée sur la détermination de la solution de compromis à un problème en calculant les utilités et les regrets des alternatives. La décision finale est prise en choisissant l'alternative ayant une utilité maximale et un regret individuel minimal (A.Biswas, 2009.).

#### Déroulement de la méthode

- **Étape 1** : La normalisation de la matrice de contexte. Chaque élément de la matrice peut être calculé ;
- **Étape 2** : identifier l'attribut idéal positif et négatif. Les indexes  $j_1$  et  $j_2$  correspondent respectivement aux ensembles des indices des attributs de maximisation et de minimisation ;
- **Étape 3** : Calcul de la mesure utilitaire et celle du regret ;
- **Étape 4** : L'intégration de ces deux mesures  $S_i$  et  $R_i$  pour le calcul de l'indice de VIKOR  $Q_i$ .

### I.8.7. Data envelopment analysis (DEA)

La méthode DEA a été développée par Charnes et al. (1978, 1981) Pour évaluer l'efficacité d'un programme fédéral américain d'allocation de ressources aux écoles (« Programme Follow Through »). L'utilisation de la méthode DEA s'est ensuite généralisée dans les autres organisations publiques (hôpitaux, EMS, services sociaux, offices de chômage, usines électriques, unités de police, corps de l'armée, usines de traitement des déchets, entreprises de

transports publics, entreprises forestières, bibliothèques, musées, théâtres, etc.) et dans le secteur privé (banques, assurances, commerces de détail, etc.).

### **Déroulement de la méthode**

La méthode DEA permet d'évaluer la performance des organisations (appelées décision making units –DMUs–) qui transforment des ressources (inputs) en prestations (outputs). Elle est adaptée tant aux entreprises du secteur privé qu'aux organisations du secteur public. Elle peut également être appliquée à des entités comme des villes, des régions, des pays, etc.

Le score d'efficacité de chaque organisation est calculé par rapport à une frontière d'efficacité. Les organisations qui se situent sur la frontière ont un score de 1 (ou 100%). Les organisations qui sont localisées sous la frontière ont un score inférieur à 1 (ou 100%) et disposent par conséquent d'une marge d'amélioration de leur performance. Relevons qu'aucune organisation ne peut se situer au-dessus de la frontière d'efficacité car il n'est pas possible d'obtenir un score supérieur à 100%. Les organisations situées sur la frontière servent de pairs (ou de benchmarks) aux organisations inefficaces. Ces pairs sont associés aux best practice observables. La méthode DEA est par conséquent une technique de benchmarking.

Deux modèles de base sont utilisés en DEA, aboutissant chacun à l'identification d'une frontière d'efficacité différente :

- Le premier modèle fait l'hypothèse que les organisations évoluent dans une situation de rendements d'échelle constants (modèle constant return to scale –CRS–)
- Le second modèle fait l'hypothèse que les organisations évoluent dans une situation de rendements d'échelle variables (modèle variable return to scale –VRS–)

### **I.8.8. Analytic hierarchy process (AHP)**

Le Processus de Hiérarchie Analytique (AHP) est développé par Thomas L. Saaty (Saaty, 1990). C'est un processus populaire et largement utilisé dans différents domaines et il est particulièrement exploité dans la résolution des problèmes rencontrés lors des situations de décision où l'aspect multicritères est impliqué. L'AHP est un modèle hiérarchique simple qui consiste à définir des relations entre les différents niveaux formés par un cadre considéré comme un objectif à atteindre. Ce processus représente la manière de prise des décisions mis en oeuvre par son pouvoir. Il définit la méthodologie appliquée lorsque la prise de décisions implique des priorités d'arrangement. La méthode de hiérarchie multicritères se base sur l'établissement d'une façon cohérente des niveaux de priorité entre les critères par des paires de comparaison pour permettre aux utilisateurs de juger le poids relatif de chaque critère (ou des sous-critères) par rapport aux autres.

### **Déroulement de la méthode**

La méthode AHP s'applique en procédant comme suit :

- **Etape 1** : Décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments inter-reliés. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif « Le dernier niveau est celui des actions » ;
- **Etape 2** : Procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Echelle de comparaisons binaires) (Saaty, 2003), tout en respectant le principe de réciprocité.

**Tableau I.14.**Echelle de Saaty de la méthode AHP

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale des deux éléments
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre
7	Importance attestée d'un élément par rapport à un autre
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines
Réciprocité	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'elle est comparée à l'élément j, ce dernier aura donc la valeur inverse lorsqu'on le compare à i

### **I.8.9. Analytic network process (ANP)**

Analytic Network Process (ANP) a été développé par Thomas Saaty. Le Processus du Réseau Analytique (ANP) est une approche générale de l'AHP appliquée quand les problèmes de décision ne peuvent pas être hiérarchiquement structurés. Il résout les limitations de l'AHP et donne une solution du problème quand le composant du niveau le plus bas peut affecter le niveau le plus haut. Aussi, l'ANP tient compte du rapport de retour d'information (feedback) dans le modèle et reflète la façon de prendre une décision où l'importance des critères de contexte peut être influencée par une alternative disponible. Ainsi, l'ANP peut fournir une interaction entre les éléments de niveaux différents (ce qui est irréalisable avec l'AHP) où plusieurs éléments dans le même niveau ou au sein de niveaux différents peuvent être dépendant les uns aux autres. (T. JEANDIN, 2015)

#### **Déroulement de la méthode**

Le concept de la méthode ANP se base sur un couplage de deux les pièces. La première consiste en une hiérarchie de contrôle ou réseau de critères et sous-critères contrôlant les interactions dans le système étudié. La seconde est un réseau d'influences parmi les éléments et groupes. Le réseau varie d'un critère à l'autre et une super matrice d'influence limitant est calculée pour chaque critère de contrôle. Enfin, chacune de ces super matrices est pondérée par la priorité de ses critères de contrôle et les résultats sont synthétisés par addition pour tous les critères de contrôle

L'approche ANP comprend quatre étapes :

- **Étape 1** : Construction du modèle et structuration du problème : Le problème doit être clairement énoncé et décomposé en un système rationnel comme un réseau ;
- **Étape 2** : Comparaisons par paires et vecteurs de priorité : dans ANP, comme dans AHP, des paires d'éléments de décision dans chaque cluster sont comparés en fonction de leur importance par rapport à leurs critères de contrôle. En outre, les interdépendances entre les critères d'une grappe doivent également être examinées deux à deux, l'influence de chaque élément sur d'autres éléments peut être représentée par un vecteur propre. Les valeurs d'importance relative sont déterminées avec l'échelle de Saaty ;
- **Étape 3** : Formation de supermatrice : Le concept de supermatrice est similaire au processus de chaîne de Markov. Pour obtenir global priorités dans un système aux influences interdépendantes, les vecteurs de priorité locaux sont entrés dans le répertoire approprié. Colonne d'une matrice. En conséquence, une supermatrice est en fait une matrice partitionnée, où chaque segment de matrice représente une relation entre deux clusters dans un système ;
- **Étape 4** : Synthèse des priorités des critères et des alternatives et sélection des meilleures alternatives : La priorité des poids des critères et des alternatives peut être trouvés dans le supermatrice normalisé.

### I.8.10. Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH)

MACBETH est une méthodologie d'aide à la prise de décision qui permet l'évaluation d'options contenues de critères multiples. La distinction fondamentale entre MACBETH et d'autres méthodes d'Analyse de la Décision avec critères multiples est qu'elle nécessite seulement des jugements qualitatifs concernant les différences d'attractivité entre éléments pour générer des cotes pour les options sur chaque critère et pour pondérer les critères (M-MACBETH)

Sept catégories sémantiques de différence d'attractivité sont introduites dans MACBETH : différence d'attractivité nulle, très faible, faible, modérée, forte, très forte et extrême.

#### Déroulement de la méthode

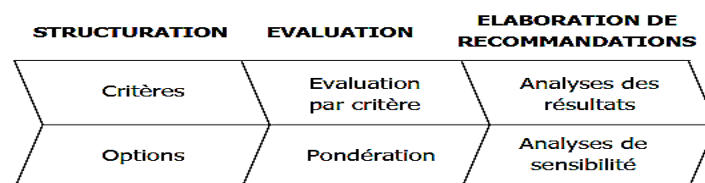


Figure I. 15. Concept de la méthode MACBETH

- **Structuration**  
- Critères : Structurer les points de vue et identifier les critères,

- Options : Définir les options à évaluer ainsi que leurs performances.
- **Evaluation**
  - Evaluation par critère : Evaluer l'attractivité des options sur chaque critère,
  - Pondération : Pondérer les critères.
- **Elaboration de recommandations**
  - Analyse des résultats : analyser l'attractivité globale de chaque action et exploiter les résultats du modèle,
  - Analyses de sensibilité : analyser la sensibilité et la robustesse en fonction de différents types d'incertitude.

En pratique, la pertinence de chacune de ces activités et l'ordre dans lequel elles se présentent peut varier en fonction des spécificités du contexte décisionnel.

### **I.8.11. Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE)**

Les méthodes PROMETHEE développées par (Brans et al., 1986) sont des méthodes d'analyse multicritère de sur classement. Elles permettent de définir des relations de sur classement, d'indifférence et d'incomparabilité entre deux scénarios du meilleur au moins bon. Pour chaque scénario, une note et un poids sont attribués à chaque critère, afin d'évaluer l'indice de préférence d'un scénario sur l'autre. Cet indice est ensuite utilisé pour calculer l'attractivité d'un scénario sur l'autre, définie comme différence entre la dominance des scénarios par rapport à tous les autres, et la soumission de ce scénario par rapport à tous les autres.

Les méthodes PROMETHEE sont utilisées dans de nombreux cas de recherche opérationnelle, et plus récemment dans la prise de décision en matière environnementale (Simon et al., 2004).

L'objectif des méthodes d'analyse multicritère PROMETHEE est de construire via un système de préférences floues, un classement des alternatives des meilleures aux moins bonnes.

Les méthodes PROMETHEE se basent sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction exprimant la préférence du décideur pour une action par rapport à une autre action. Pour chaque critère, le décideur est appelé à choisir une des six formes de courbes représentées ci-dessous. Les paramètres relatifs à chaque courbe représentent des seuils d'indifférence et/ou de préférence (Albadvi et al., 2007).

- **La fonction type I** : est généralement employée lorsque les données présentent un caractère discret tel un classement ordinal ou encore une valeur de type tout ou rien ;
- **La fonction type II** : est employée lorsque les seuils d'indifférence sont clairement apparents dans les données du problème posé ;
- **La fonction type III** : est généralement employée lorsque les données sont telles que les écarts entre elles présentent un caractère continu, ou encore lorsque toutes les valeurs intermédiaires entre les valeurs maximales et minimales de ces écarts sont possibles ;

- **La fonction type IV** : est parfois employée lorsqu'on peut affirmer qu'un candidat n'est à la fois ni strictement préféré à un autre, ni indifférent (Azzabi et al., 2009b). Ce candidat caractérisé par un écart donné par rapport à un autre se verra attribuer 1/2 point ;
- **La fonction type V** : est employée lorsque les seuils d'indifférence et de préférence stricte sont clairement apparents dans les données du problème multicritère posé (Azzabi et al., 2009a) ;
- **La fonction type VI** : est la fonction la plus employée dans les applications pratiques et est particulièrement indiquée en cas d'un nombre de candidats suffisamment élevé. Dans ce cas il convient de calculer l'écart type  $\sigma$  de cette distribution (Azzabi et al., 2008a).

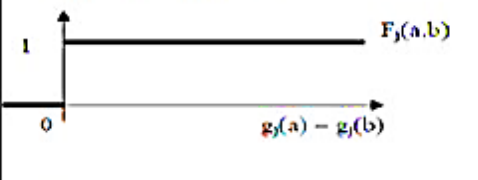
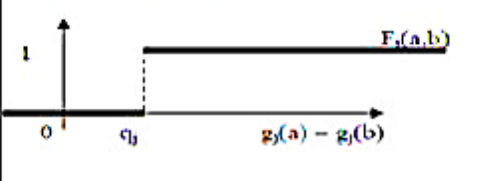
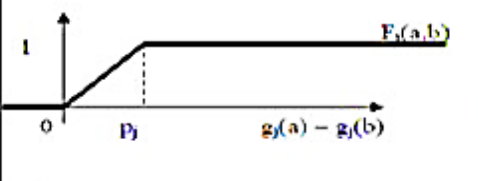
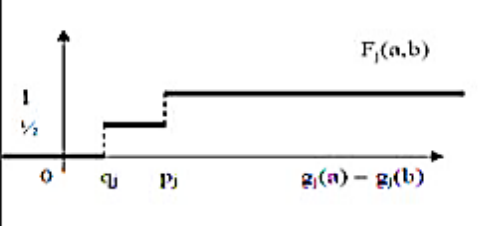
<p><i>1<sup>ère</sup> forme : Vrai-critère</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Préférence stricte immédiate.</li> <li>• Pas de paramètres à déterminer.</li> </ul> $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) > g_j(b) \\ 0 & \text{si } g_j(a) \leq g_j(b) \end{cases}$
<p><i>2<sup>ème</sup> forme : Quasi-critère</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il existe un seuil d'indifférence (quasi-critère) qui doit être fixé.</li> </ul> $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > q_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$
<p><i>3<sup>ème</sup> forme : Pré-critère</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La préférence croit jusqu'à un seuil de préférence qui doit être fixé.</li> </ul> $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{g_j(a) - g_j(b)}{p_j} & \text{si } 0 < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq 0 \end{cases}$
<p><i>4<sup>ème</sup> forme : Pseudo-critère I</i></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il existe un seuil d'indifférence et un seuil de préférence à fixer (pseudo-critère): entre les deux, la préférence est moyenne.</li> </ul> $F_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) > p_j \\ \frac{1}{2} & \text{si } q_j < g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 0 & \text{si } g_j(a) - g_j(b) \leq q_j \end{cases}$

Figure I. 16. Différents types de critères (Vincke, 1994)

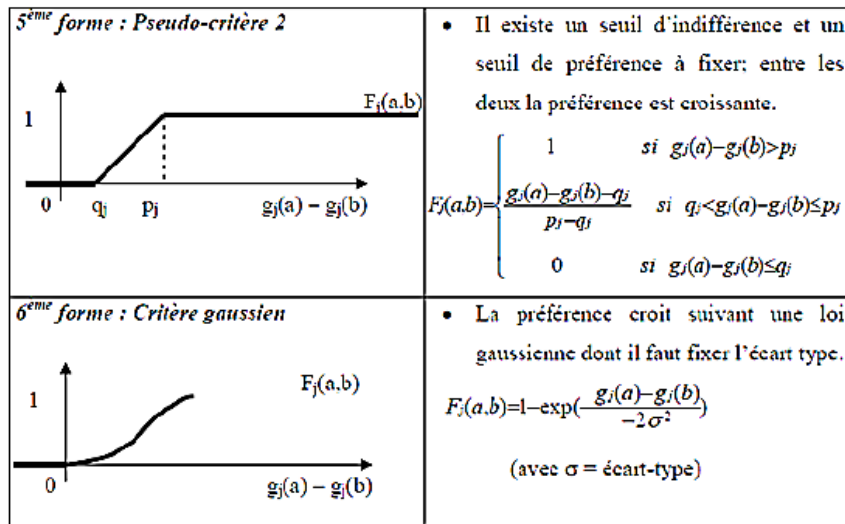


Figure I. 17. Différents types de critères (Vincke, 1994) – Suite

### Déroulement de la méthode

L'application des méthodes PROMETHEE se caractérisent par trois étapes :

- L'enrichissement de la structure de préférence : cette étape se réfère à la notion de critère généralisé qui est introduite dans le souci de prendre en considération les amplitudes des écarts entre les évaluations faites sur les critères choisis par le décideur. Ce critère généralisé repose sur le développement d'une fonction de préférence  $P(a; b)$  qui permet de déterminer le degré de préférence qui est compris entre 0 et 1.
- L'enrichissement de la relation de dominance : Au niveau de cette étape, une relation de la valeur de sur classement est construite prenant en compte tous les critères. A ce stade pour chaque paire d'actions, un degré de préférence global d'une action sur l'autre est défini.
- L'exploitation de l'aide à la décision : Cette étape consiste à évaluer le comportement de chaque action en fonction de  $(n - 1)$  actions. Cela revient à ranger les actions de façon partielle ou totale en utilisant les méthodes PROMETHEE I et II. L'application de ces deux méthodes est basée sur le calcul des flux de sur classement.

### **I.8.12. Elimination and choice expressing reality (ELECTRE)**

Les méthodes d'analyse multicritère ont été développées suites aux besoins qui se sont fait sentir dans le domaine de l'aide à la décision. Les projets de grande envergure, en effet, nécessitent des choix qui font bien souvent intervenir des critères peu compatibles. Pour résoudre ce genre de problème, il faut donc faire appel à des méthodes de formalisation qui permettent d'effectuer des classements entre les diverses décisions, c'est le but des méthodes ELECTRE (Élimination Et Choix Traduisant Réalité) qui ont été mises au point par Roy qui est une famille de méthodes d'analyse multicritères développée en Europe à la fin des années 1960 les versions de cette méthode sont : ELECTRE II (Roy et Bertier, 1971), ELECTRE III (Roy, 1978), ELECTRE IV

(Hugonnard et Roy, 1982), ELECTRE IS (Roy et Skalka, 1984), ELECTRE A (non publié pour raisons confidentielles). Ces méthodes se servent :

- D'une hypothèse de sur classement ;
- D'une notion de concordance et de non-discordance.

### **Déroulement de la méthode**

Cette méthode permet de choisir la meilleure action suivant un groupe de critères. Dans ce but et au moyen de la relation de sur classement S, il est nécessaire d'effectuer une partition de l'ensemble A des actions potentielles en deux sous-ensembles N et A/N complémentaires tels que toute action appartenant à A/N est surclassée par au moins une action appartenant à N. Les actions-éléments de A/N sont éliminées. Les actions appartenant à N sont incomparables entre elles, ce sont les actions sélectionnées.

- **Indice de concordance** :

Il est dit du critère j qu'il concorde avec l'hypothèse " l'action ai surclasse l'action (ak) " si l'action ai est au moins aussi bonne que l'action (ak) en ce qui concerne le critère j ; ce qui se traduit par (Maystre et al. 1994) :

$$g_j(a_i) \geq g_j(a_k).$$

- **Non-discordance** :

La condition de non-discordance permet de refuser le sur classement d'une action sur une autre, obtenu après application de la condition de concordance, lorsqu'il existe une opposition trop forte sur un critère au moins (Maystre et al. 1994).

- c: est le seuil de concordance , il est relativement grand  $c \in [1/2,1]$  ;
- d: est le seuil de discordance , il est relativement petit.

- **Relation de sur classement** :

La relation de sur classement S est construite en prenant appui sur une notion de concordance et une notion de discordance. L'hypothèse de sur classement sera acceptée si un test de concordance et un test de non-discordance sont satisfaits (Maystre et al. 1994).

### **I.8.13. Multi-attribute utility theory (MAUT)**

La méthode MAUT développée par Keeney et Raifa en 1976 (B.Taibi, 2010) peut être utilisée pour résoudre les problèmes de choix ou de rangement multicritère sur un ensemble d'actions. Elle construit une fonction d'utilité à partir d'un pré ordre défini par l'utilisateur sur un sous ensemble d'actions de référence.

La procédure, basée sur un principe de régression ordinale, consiste à résoudre un programme linéaire. L'utilisateur peut modifier d'une façon interactive les fonctions d'utilité dans les limites fournies par une analyse de sensibilité du problème de régression ordinale. Pour effectuer ces

modifications, l'utilisateur est aidé par une interface graphique très conviviale. La fonction d'utilité acceptée par l'utilisateur sert alors à définir un pré ordre sur l'ensemble des actions.

#### **Déroulement de la méthode :**

MAUT est convenable pour incorporer des préférences des risques d'incertitudes dans les problèmes de décisions multicritères à partir d'une manière conséquente. La méthode MAUT repose sur la même idée que la méthode MAVT. En revanche, elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont imprégnées d'incertitude (aléatoire). L'idée est assez simple, le décideur doit associer une utilité à chacune des actions considérées. Pour ce faire, il va considérer séparément ces critères, et observer quelle utilité dégage chaque critère pour l'action considérée. En effet, l'utilité  $V(x_1, x_2, \dots, x_n)$  associée à l'action, évaluée sur les critères 1, 2, .. peut se décomposer sous la forme  $V(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n v_i(x_i)$  étant l'utilité générée au vu du critère  $i$ , si l'action considérée à la performance  $x_i$ , à condition que les critères considérés soient indépendant .

#### **I.8.14. Multi-attribute value theory (MAVT)**

La méthode MAVT développée par Keeney et Raifa en 1976 ([D.Ayadi, 2010.](#)) repose sur l'idée fondamentale suivante : tout décideur essaie inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction qui agrège tous les attributs. La particularité de la méthode MAVT réside dans l'idée de construction d'une fonction de valeur partielle pour chaque attribut. La meilleure action sur un attribut aura une valeur partielle (par rapport à l'attribut étudié) égale à 1 et la pire des actions aura une valeur partielle égale 0. En posant des questions au décideur, nous construisons les fonctions de valeur partielle. Nous construisons ensuite, et ce en fonction des caractéristiques des préférences du décideur, la fonction de valeur.

La méthode MAVT s'applique dans un contexte caractérisé par un ensemble d'actions explicite, une articulation a priori des préférences et un univers déterministe (les évaluations des actions par rapport à chaque attribut sont certaines) ([Farquhar, 1984.](#)).

#### **Déroulement de la méthode**

Les étapes de la méthode MAVT sont comme suit :

- **Etape 1 :** Évaluer chacune des actions selon chaque critère (construire la matrice de décision : tableau multicritère) ;
- **Etape 2 :** Construire des fonctions de valeur partielle pour chaque critère (traduire le tableau multicritère en utilisant les valeurs) ;
- **Etape 3 :** Établir les poids des critères ;
- **Etape 4 :** Calculer l'évaluation globale pour chaque action en utilisant une forme d'agrégation appropriée ;
- **Etape 5 :** Déterminer la meilleure action (l'action qui maximise la valeur : celle qui a le plus grand score) ;
- **Etape 6 :** Faire des analyses de sensibilité ([Guitouni, 2000.](#)).

### **I.8.15. Méthode d'évaluation spatio-temporelle (MOVISS)**

Les approches « qualitatives », telles que définies Ercole, en intégrant la dimension psychosociologique par le biais des représentations cognitives, ont été traduites de manière quantitative dans les années 1990-2000. Les travaux de Cutter ou Chardon, par exemple, n'intègrent pas la dimension individuelle et visent à évaluer une vulnérabilité territoriale.

Cependant, ces travaux tendent à étudier préférentiellement les résidents, puisque, les méthodes d'échantillonnage souvent se basent sur les données de recensement. Or, considérer la seule population résidente pour évaluer la vulnérabilité sociale d'un espace urbain peut paraître réducteur. Pour cette raison, certaines études se sont intéressées à la vulnérabilité des résidents mais aussi des actifs. Par ailleurs, la structure et la distribution spatiale de la population évoluent constamment dans le temps, C'est pourquoi, il peut sembler nécessaire d'affiner les méthodes d'échantillonnage pour prendre en compte les variations de la distribution spatio-temporelle de la population, et intégrer les mobilités, celles-ci constituant un facteur de vulnérabilité important. (Davoine et al., 2012)

#### **▪ Objectif et principe de la méthode MOVISS**

La méthode MOVISS (2012) est basée sur la distribution quantitative et qualitative de la population au sein des différents quartiers d'une ville évolue au cours de temps. On considère que la population présente dans un quartier à un temps  $t$  est constituée de trois groupes de personnes (Les habitants du quartier ; Les transitant et les usagers selon leurs activités ; Les passagers).

L'information préventive est distribuée différemment aux usagers et aux résidents : les résidents reçoivent l'information à leur domicile. Les usagers sont eux-mêmes des résidents mais d'un autre quartier ou d'une autre commune et peuvent recevoir des informations différentes. Partant de la proposition que l'information et le vécu des populations influencent leur perception de leur environnement et a fortiori des risques auxquels elles sont exposées, on peut alors s'attendre à observer des résultats différents en termes de vulnérabilité sociale entre usagers et résidents.

Donc la méthode pour l'évaluation spatio-temporelle de la vulnérabilité, en nous basant sur des données de mobilité quotidienne et l'objectif est de prendre en compte des différenciations spatiales de vulnérabilité en vue de la réduire. La démarche propose donc d'identifier, par l'intermédiaire d'une enquête, les déterminants de la vulnérabilité sociale, et de quantifier cette vulnérabilité au moyen d'indices spatio-temporels liés aux variations d'exposition. Ces indices permettront de construire des scénarios de réduction de la vulnérabilité par une intervention plus ciblée. Afin de définir les facteurs déterminants de vulnérabilité sociale et de réduire le risque sismique.

### **I.8.16. Analyse multicritère spatial (SEVI) et Indice de vulnérabilité sociale (SoVI)**

Deux méthodes multicritères qui agrègent des indicateurs complexes, visant à révéler la vulnérabilité sociale, dans un contexte de tremblement de terre et à explorer les résultats statistiques dans une approche spatiale (Armas, Gavris, 2013).

Un modèle de conceptualisation de vulnérabilité qui consiste en deux approches (Füssel, 2005). Une approche de la géographie humaine visant à comprendre la vulnérabilité d'un système aux effets néfastes de risques, en présence du séisme et une approche de l'écologie humaine qui vise à déterminer qui est vulnérable et pourquoi. Dans les sections trois à sept on montre le cadre d'analyse, on identifie la région de préoccupation, en argumentant sur le type de danger impliqué dans la vulnérabilité et enfin, nous faisons des commentaires sur l'évaluation qu'on a faite.

#### **▪ Conception de l'indice : Modèle SoVI contre modèle SEVI**

Certains avantages soutiennent l'accord sur l'utilisation des indices :

Ils sont créés pour une meilleure compréhension de la société et ses relations, en condensant ce système complexe avec des données numériques. "Mesures d'une construction théorique abstraite dans laquelle deux ou plusieurs indicateurs de la construction sont combinés pour former un seul résumé score" Selon certaines définitions. L'absence d'un cadre bien établi, où les concepts et la méthodologie peuvent être utilisés à différents niveaux d'analyse, fait valoir que le jugement subjectif joue toujours un rôle majeur dans la conception des indices: pour agréger les indicateurs, ils doivent se soumettre à une série de techniques de normalisation (Utilisation de la standardisation min-max, la transformation d'échelle linéaire, fonctions de valeur/utilité, probabilités, distance à référence, approche floue et transformations de la partition z).

Une autre exigence consiste à inclure des pondérations, car les différents indicateurs et les sous-indices ont généralement des niveaux différents d'importance. Les indices diffèrent également dans la pondération des indicateurs. Dans certains cas, même en utilisant le même concept et la méthodologie, des différences peuvent apparaître et la nécessité d'adapter les indices doit être prise en compte.

### **I.8.17. Modèle artificielle de réseau neuronal (ANN) pour les séismes**

Cette étude vise à étudier la vulnérabilité sociale en évaluant l'aspect social de la vulnérabilité aux aléas sismiques à l'aide d'un réseau neuronal artificiel (ANN). En se basant sur les trois points méthodologiques.

- les données sur la région étudiée ;
- la détermination des poids d'indice est un problème difficile dans la littérature actuelle sur la recherche sur la vulnérabilité sociale. La subjectivité des méthodes de pondération (AHP) (TOPSIS)

- Troisièmement, la méthode basée sur les ANN répond aux exigences requises pour la prévision des séismes. Les systèmes ANN peuvent traiter séquentiellement les informations des unités interconnectées, qui répondent aux variables entrées incluent les poids, les seuils et les fonctions mathématiques transférables.

En outre, ANN peut reconnaître des modèles complexes dans des ensembles de données que les procédures de calcul conventionnelles sont incapables de résoudre. De plus, il fournit des prédictions cohérentes, même à travers des données incertaines ou bruyantes (Alizadeh et al., 2018).

## I.9 Synthèse

Nous avons vu qu'il existe une importante variété de MMAD pour évaluer un projet. Les paramètres principaux définissant l'utilisation d'une méthode plutôt qu'une autre est la simplicité, la clarté d'utilisation, la finesse de l'évaluation (qui ne garantit pas forcément la justesse), la flexibilité (ou adaptabilité). L'expérience montre qu'une évaluation ne peut pas être basée sur une méthode unique mais qu'il est préférable de combiner différentes méthodes (Pictet, 1996).

Le **Tableau I.14** résume l'ensemble des méthodes que nous avons présenté dans cette partie

**Tableau I.15.** Tableau de synthèse des méthodes multicritères

Méthodes	Avantages	Inconvénient
SAW	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Capacité à compenser entre les critères</li> <li>•Intuitif pour les décideurs</li> <li>•Le calcul est simple ne nécessite pas de programmes informatiques complexes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Les estimations révélées ne reflètent pas toujours la situation réelle</li> <li>•Le résultat obtenu peut ne pas être logique.</li> </ul>
CP	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Le compromise programming a l'avantage d'avoir une fonction objectif facile à formuler.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•la résolution du modèle Compromise Programming peut être beaucoup plus difficile dans le cas où on dispose d'un ensemble de contraintes à respecter.</li> <li>•Le défaut du Compromise Programming est de proposer une action médiocre si toutes les actions ne sont pas bonnes.</li> <li>•Le Compromise Programming exige une articulation a- priori des préférences</li> </ul>
GP	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Le Goal Programming a l'avantage d'aborder les problèmes sous l'angle de satisfaction d'objectifs.</li> <li>•Le Goal Programming s'avère utile pour modéliser des problèmes qui n'ont pas de solution optimale.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Le Goal Programming dans sa forme standard peut générer des solutions non « performantes » dans le cas où les objectifs sur les critères sont fixés de façon pessimiste.</li> </ul>

Tableau I.16. Tableau de synthèse des méthodes multicritères- Suite

Méthodes	Avantages	Inconvénient
TOPSIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'apport de la méthode TOPSIS est l'introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal</li> <li>• Elle est facile à appliquer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les attributs doivent être de nature cardinale, les préférences sont fixées a priori.</li> <li>• Si toutes les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises.</li> </ul>
DEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capable de gérer plusieurs entrées et sorties</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne traite pas de données imprécises</li> <li>• Suppose que toutes les entrées et sorties sont exactement connues.</li> </ul>
AHP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la méthode AHP permet la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique.</li> <li>• Elle utilise une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires.</li> <li>• Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions.</li> <li>• L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.</li> </ul>
MACBETH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode MACBETH permet de combiner deux types d'information une information sur les préférences révélées par le décideur, une information sur l'importance des critères et leurs interactions, limitées aux paires de critères.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• les échelles de la méthode MACBETH ne sont pas bornées.</li> <li>• Dans la méthode MACBETH, la détermination des constantes d'échelle suit le même processus que pour la détermination des échelles d'attractivité.</li> </ul>
PROMETHEE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode PROMETHEE I construit une relation de sur classement évaluée traduisant une intensité de préférence</li> <li>• La méthode PROMETHEE II construit un préordre total excluant l'incomparabilité et réduisant fortement l'indifférence.</li> <li>• La méthode PROMETHEE III introduit des seuils d'indifférence sur les flux, ce qui minimise les nombreux calculs pour l'obtention de ces flux</li> <li>• La méthode PROMETHEE IV a un intérêt plutôt théorique et concerne des ensembles infinis d'actions.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode PROMETHEE I : L'indifférence est en pratique très rare vu les nombreux calculs pour obtenir les flux.</li> <li>• La méthode PROMETHEE II apparaît clairement comme une méthode d'utilité, les comparaisons 2 à 2 ne servant qu'à masquer le calcul du score final <math>\phi(a)</math> de chaque action.</li> <li>• La méthode PROMETHEE III : Dans cette méthode les seuils d'indifférences n'ayant pas d'interprétation concrète pour le décideur, ils font l'objet de calculs statistiques qui rendent la méthode moins "accessible".</li> <li>• La méthode PROMETHEE IV : La méthode nécessite le calcul d'intégrales au lieu de sommes.</li> </ul>

**Tableau I.17.** Tableau de synthèse des méthodes multicritères- Suite

Méthodes	Avantages	Inconvénient
ELECTRE	<ul style="list-style-type: none"> <li>•La méthode ELECTRE I est utilisée pour des problématiques de sélection.</li> <li>•Elle introduit la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures actions.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Elle exige de traduire les performances des actions en notes, ce qui suscite une gêne chez certains utilisateurs qui y voient une perte de maîtrise de leurs données.</li> </ul>
MAUT	<ul style="list-style-type: none"> <li>•La méthode MAUT permet les évaluations des actions par rapport aux attributs qui sont imprégnés d'incertitude (aléatoire).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C'est une procédure très exigeante de point de vue informationnel. Par ailleurs, la construction des fonctions de valeur n'est pas toujours une tâche évidente.</li> <li>•La construction de la fonction analytique V est une tâche ardue.</li> <li>• L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèques très restrictives du point de vue théorique.</li> </ul>
MAVT	<p>La méthode MAVT est très pratique pour les problèmes d'aide à la décision, les problèmes d'économie, de finance et d'actuariat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•C'est une procédure très exigeante de point de vue informationnel. Par ailleurs, la construction des fonctions de valeur n'est pas toujours une tâche évidente.</li> <li>•La construction de la fonction analytique V est une tâche ardue.</li> <li>•L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèques très restrictives du point de vue théorique.</li> </ul>

## I.10 Conclusion

La comparaison des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments, mentionnées dans la première partie du présent chapitre, montre qu'il n'existe pas de méthode idéale. Ces approches ont tous un principe général commun, à savoir l'identification de la typologie constructive et de facteurs de vulnérabilité permettant d'estimer un niveau global de vulnérabilité de l'ouvrage.

A l'échelle locale, mis à parts la méthode de la fiche d'évaluation des dommages du centre technique de construction CTC, il n'existe pas de méthode nationale ou de règlement concernant les approches qualitatives de la vulnérabilité au séisme des constructions. Plusieurs tentatives modèles ont été développées par la communauté universitaires, sauf que ces approches se sont restreintes au stade académique.

Nous avons vu, dans la deuxième partie de ce chapitre, que les méthodes d'aide multicritère à la décision sont des techniques assez récentes et en plein développement. Par leur manière

d'intégrer tout type de critères, ces procédures semblent mieux permettre de se diriger vers tous les domaines.

Assez souvent, dans ces processus de décision nous demandons l'avis, l'aide, le support d'ami(e)s, d'experts, de sociétés de conseil, etc. Ce qui caractérise l'aide à la décision à la fois comme activité scientifique et comme activité professionnelle est son approche qualifiée de « formelle : langages pour réduire l'ambiguïté de la communication humaine » et « abstraite : langages indépendants du domaine de discours ». Techniquement, l'aide à la décision multicritère est développée pour traiter plusieurs classes de problèmes de décision (choix, tri, classification, rangement...) tout en considérant plusieurs critères (attributs), souvent conflictuels et non commensurables, tout en cherchant à modéliser au mieux les préférences et les valeurs du ou des décideurs. Ce chapitre a présenté la problématique d'aide à la décision et plus particulièrement l'analyse multicritère d'aide à la décision, son processus de réalisation, ainsi que les différentes méthodes de modélisation d'un problème multicritère tel qu'elles soient des méthodes d'analyses et ou d'optimisation multicritère.

Par suite, la méthode du goal programming est une méthode de programmation mathématique multicritère qui se base sur la transformation d'un problème multi objectif en un problème uni objectif, et ceci afin d'aboutir à une solution d'optimalité en introduisant explicitement les différentes préférences du décideur sous forme des fonctions de satisfactions.

Le développement d'une méthodologie multicritère d'évaluation de la performance sismique des bâtiments d'habitation dans le contexte algérien est d'une nécessité. En effet, les méthodes disponibles, présentée dans la première partie, ont été toutes développées pour des contextes régionaux. Néanmoins, chacune d'entre elles dispose d'éléments clés que nous pouvons utiliser dans notre démarche. Nous avons vu aussi qu'il existe une grande variété de MMAD et que le choix de la méthode est principalement fonction :

- **Des circonstances** : l'objectif est-il d'évaluer les impacts majeurs ou l'ensemble des impacts ?
- **Du temps disponible** : pour la collecte des données, le développement de modèles ;
- **Des ressources disponibles** : budget, experts, équipements ;
- **De la qualité et de la disponibilité des données** : quelles variables, quelles échelles, comment les acquérir ?
- **Des retours d'expérience** : quelles méthodes ont été utilisées dans des cas comparables et quel est le bilan ? et ;
- **De l'échelle d'étude** : dimension spatiale, temporelle et humaine (combien de personnes sont impliquées dans le projet) ?

Mais le choix des méthodes d'évaluation doit dépendre également des retours d'expérience. Dans ce cadre, il est pertinent de prendre connaissance des projets comparables avant de définir les exigences méthodologiques.

Mais, pour développer notre méthodologie, il est nécessaire de mesurer l'ampleur du marché de construction résidentiel afin de définir les échelles et les objectifs. C'est l'objet du chapitre 2.

# Parc résidentiel algérien et performance sismique – État des lieux

*Notre propos central peut être résumé par cette formule : « à l'origine était la rente urbaine ». Ce chapitre sera consacré à l'étude des données statistiques disponibles sur le secteur résidentiel et la population en Algérie. L'intérêt du présent chapitre est de mesurer l'ampleur du travail à faire et de recueillir les données nécessaires. Nous avons aussi divisé ce chapitre en deux parties. Dans la première, nous présentons les données statistiques qui nous sont utiles (démographie, l'habitat, etc.). Dans la deuxième partie une attention particulière est accordée à l'historique sismique et les réglementations parasismiques Algériennes.*

## **Partie 01**

# **Parc résidentiel et population en Algérie – Statistiques données et indicateurs**

---

### **II.1. Introduction**

Le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus dynamiques dans les pays émergents, résultat d'un rythme élevé de croissance de la population et de l'urbanisation. L'Algérie ne fait pas exception, la croissance de sa population est spectaculaire, passant de 11.28 millions d'habitants en 1960 à plus de 43 millions en 2019 (ONS, 2021). Par conséquent, la demande de logements augmente considérablement et fait de la construction l'un des principaux moteurs de la croissance du pays (Moussaoui, 2018).

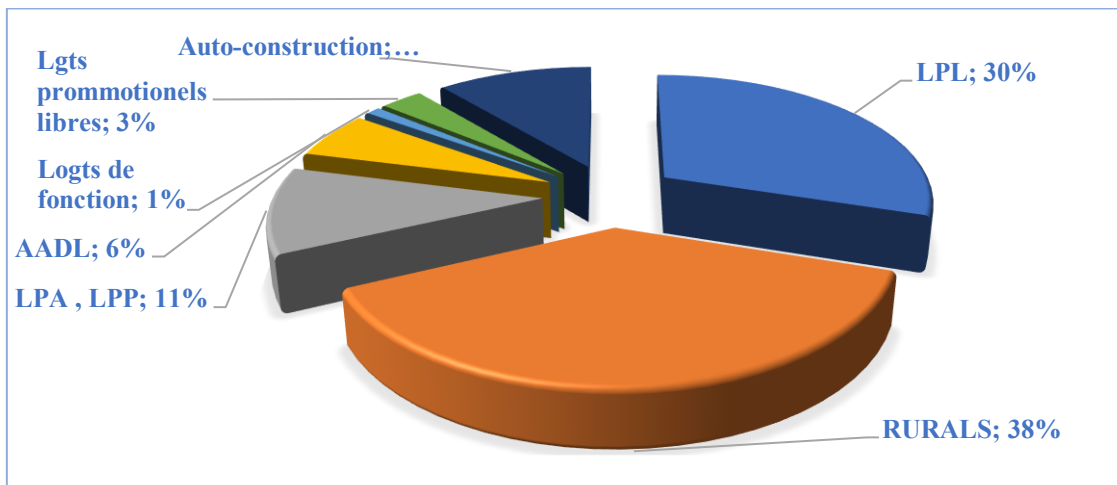
### **II.2. Le parc résidentiel en Algérie en chiffres**

Le ministre de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, Abdelwahid Temmar, a affirmé en juin 2018 à l'Assemblée populaire nationale (APN), que plus de 3.600.000 logements de différentes formules ont été réalisés durant la période allant de 1999 à mars 2018, d'un coût de 5.788 milliards de DA dont 4.615 milliards consommés. En constatant une évaluation économique dans le domaine de l'immobilier.

Le programme de logements en Algérie était ambitieux et l'Etat a réussi à réaliser un important programme de logements entre 1999 et 2018 (Tableau II.1 et Figure II.1).

**Tableau II. 1.** Distribution des logements en fonctions de leurs types

Type de logements	Quantité
Logements public locatifs (LPL)	1.176.000 logts (30 %)
Logements rural	1.583.000 logts (38%)
Logements publics participatifs et promotionnels aidés (LPP, LPA)	456.000 logts (11%)
Logements location-vente (AADL)	156.000 logts (6%)
Logements de fonction	46.000 logts (1%)
Logements promotionnels libres	138.000 logts (3%)
Logements type auto-construction	448.000 logts (11%)



**Figure II. 1.** Distribution des logements en fonction de leur type Algérie 1999-2018

La croissance dans le niveau et le nombre des résidences réalisés n’était pas stable, comme le montre l’infographie suivante :

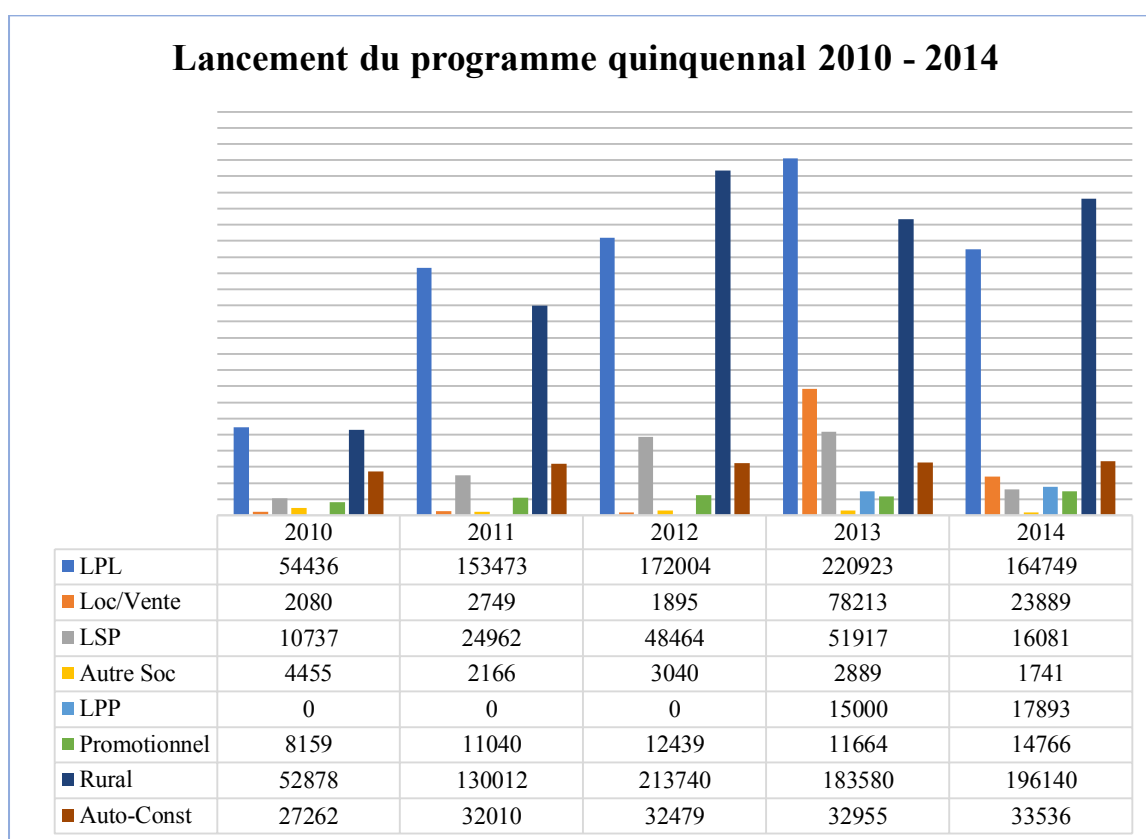


**Figure II. 2.** Nombre des logements réalisés en Algérie 1999-2018

### II.2.1. Programme quinquennal lancé durant la période 2015 – 2019

Lors des Conseils des ministres du 7 et du 21 mai 2014, le Président de la République, Abdelaziz Bouteflika « a chargé le gouvernement de préparer minutieusement le projet de programme d’investissements publics pour les années 2015 à 2019 qui, à l’issue du programme quinquennal en cours d’exécution, définira les ressources financières nécessaires à l’exécution du Plan d’action du gouvernement ».

Le nouveau plan quinquennal de développement 2015-2019, qui fait suite aux plans 2005-2009 et 2010-2014, sera destiné à renforcer la résistance de l’économie algérienne aux effets de la crise financière mondiale et à développer une économie compétitive et diversifiée (Figure II.3).



**Figure II. 3.** Les lancements du programme quinquennal 2010 – 2014 (source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)

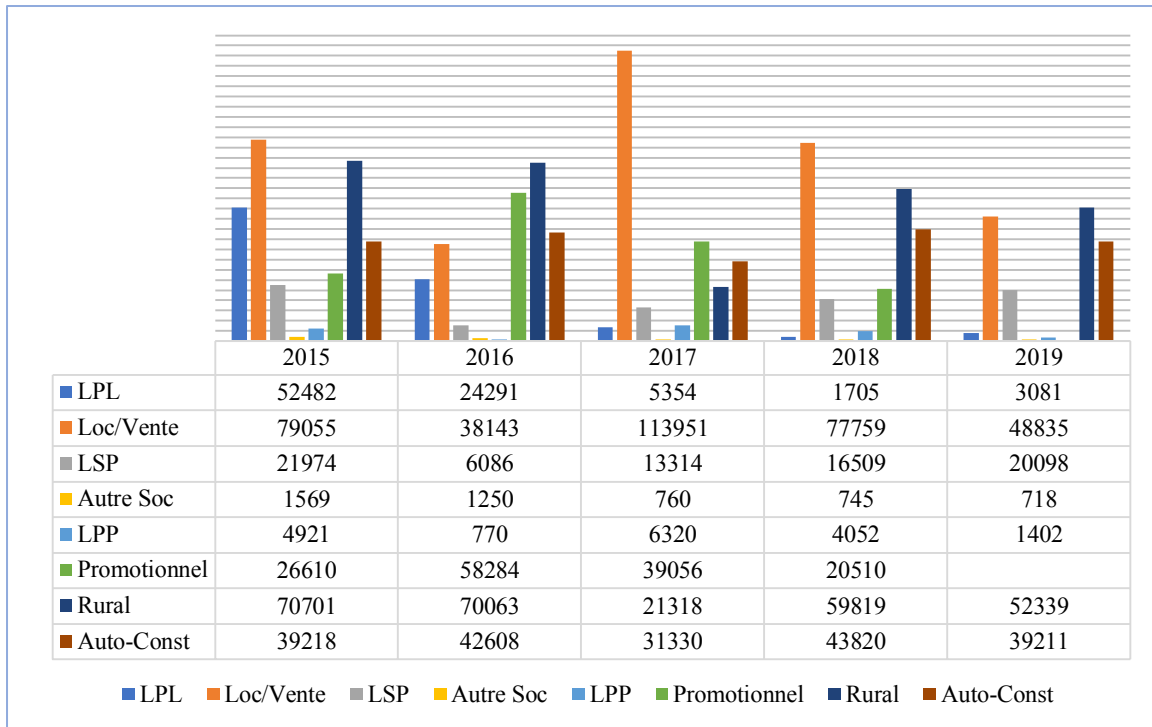


Figure II. 4. Les lancements du programme quinquennal 2015 – 2019 (source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)

### II.2.2. Programme quinquennal livré durant la période 2015 – 2019

L’élaboration du Programme 2015-2019 d’investissements et de développement, doit « intégrer, dans sa préparation, les concertations nationales et locales requises, tirer les leçons des expériences passées, et améliorer son impact sur le développement local et le développement humain, mais aussi sur le développement d’une économie productive et compétitive dans tous les secteurs », a-t-il recommandé.

Malgré les insuffisances constatées dans la réalisation des projets d’infrastructures publics comme les surcoûts et les retards accusés dans leur réception, les trois plans lancés depuis 2001 ont permis de réaliser une meilleure croissance économique et d’amorcer ainsi le développement économique et social du pays.

Cette dynamique a été relayée par un troisième plan de 286 milliards de dollars pour la période 2010-2014, lui-même conforté par des programmes spéciaux pour les wilayas du sud et des hauts plateaux.

Ce plan a consacré une enveloppe de 130 milliards de dollars pour le parachèvement des grands projets déjà entamés, notamment dans les secteurs du rail, des routes et de l’eau. Le plan 2015-2019 sera mené sous de bons auspices. Cependant, et avec l’arrivée de la crise politique ayant touché le pays suivi de la chute des prix de pétrole, ces projets ne sont pas arrivés à leur fin souhaitée. La Figure II.4 illustre les programmes de logement livrés dans la période susmentionnée.

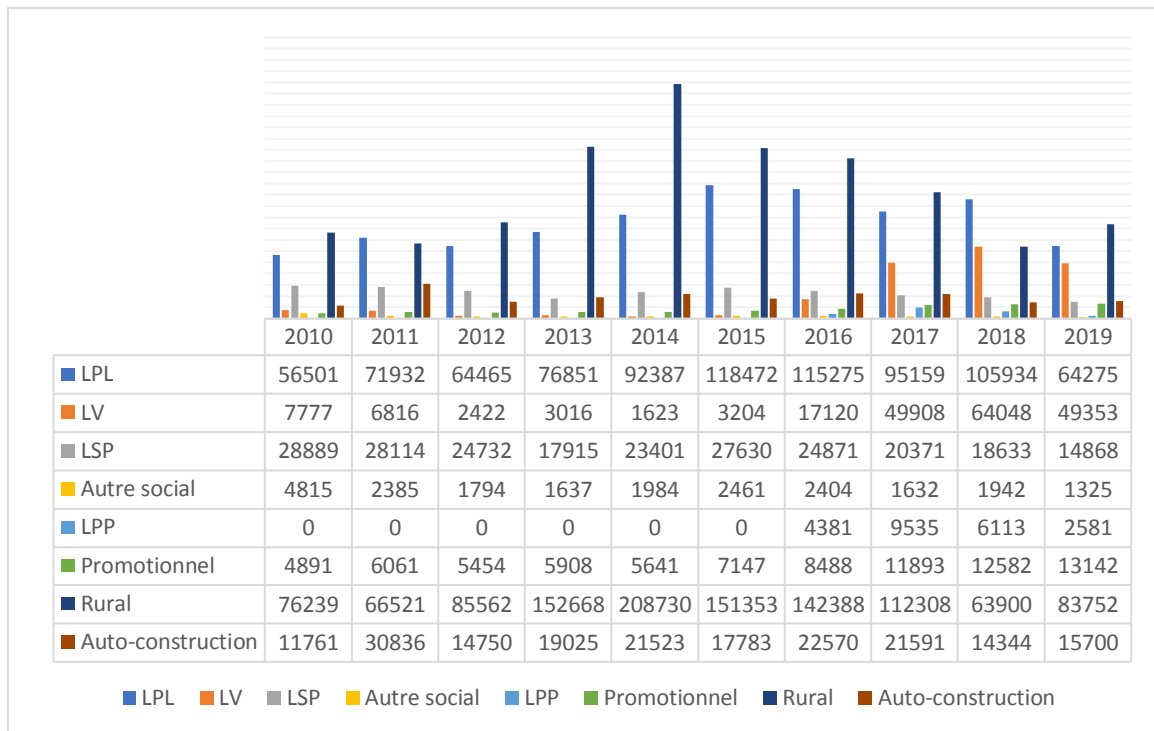


Figure II. 5. Les livraisons du programme quinquennal 2015 – 2019 (source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)

### II.2.3.Synthèse du bilan de réalisation des activités pour l’année 2020

Lors d’une réunion d’évaluation consacrée à la présentation du bilan de l’année 2020, le ministre a estimé que 2020 avait été "l’année des réalisations par excellence", au vu du nombre "considérable" de logements et infrastructures publiques livrés.

Le ministre a rappelé, à ce propos, les efforts consentis par les cadres du secteur pour la mise en œuvre des projets, à l’instar de l’Agence nationale de l’amélioration et du développement du logement (AADL), de l’Office de promotion et de gestion immobilières (OPGI), ou de l’Entreprise Nationale de Promotion Immobilière (ENPI), ainsi que des promoteurs immobiliers, sous la supervision des directions du logement, des bureaux d’études et des directeurs des équipements publics.

Ainsi, il a été procédé à la livraison de près de 52.000 logements de type LPL (Logement public locatif), de plus de 11.000 logements LPA (Logement promotionnel aidé), de plus de 69.000 logements AADL, de 3778 logements LPP (Logement promotionnel public), de plus de 49.000 logements rurales (Figure II.5).

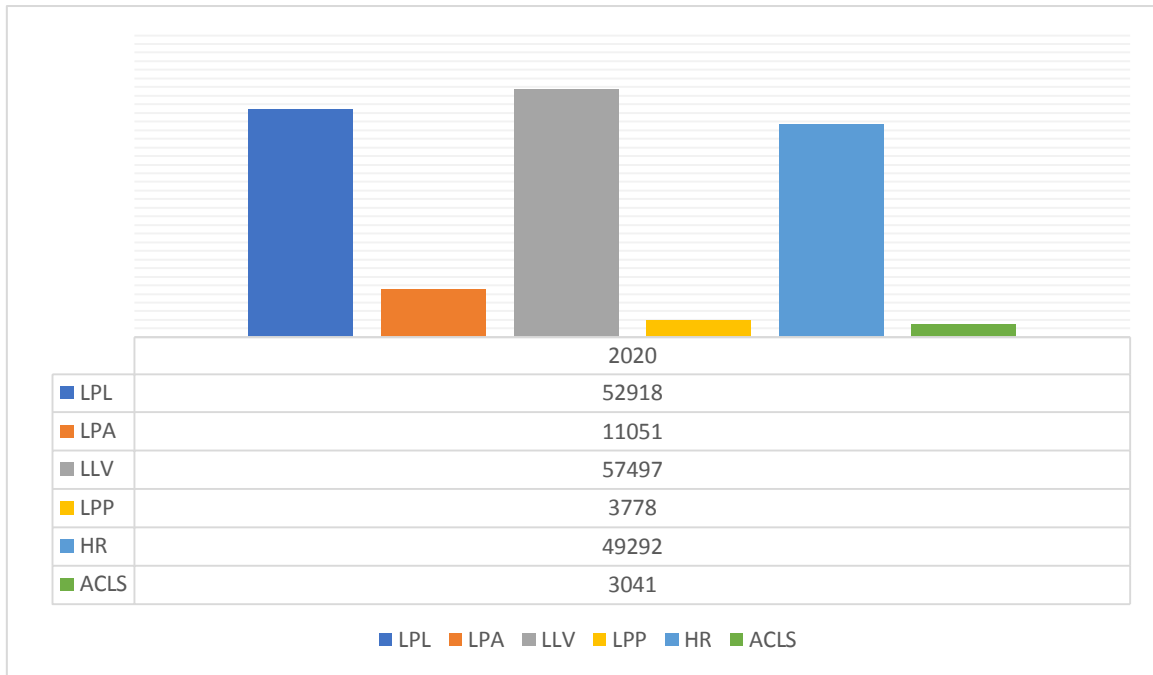


Figure II. 6. Logements livrés au titre de l'année 2020 (source : Ministère de l'habitat et de l'urbanisme)

### II.2.4. Programme de logements 2020-2024

Un plan d'action du secteur de l'Habitat, présenté en Conseil des ministres sous la présidence du président de la République, M. Abdelmadjid TEBBOUNE, prévoit l'engagement d'un nouveau programme d'un million de logements pour la période 2020-2024. A ce propos, il a instruit la création d'une "banque du logement" et a exhorté à une réflexion globale sur la création de villes périphériques afin de contenir l'exode vers les grandes villes.

A rappeler que le programme de logements en cours de réalisation, a vu l'inscription de plus de 682.000 unités en 2019 dont 273.500 logements de type location-vente (AADL), 217.500 logements publics locatifs (LPL), 114.000 de type participatif (LSP) et promotionnel aidé (LPA), outre 22.000 unités de logement promotionnel public (LPP) et 55.000 habitats ruraux.

Pour l'exercice à venir, les études prospectives élaborées par le Secteur tablent sur une meilleure dynamique en matière de réalisation des logements, prévoyant la réception et l'attribution d'importants quotas dès le premier semestre 2020.

Dans ce cadre, il est prévu la réception de 160.000 unités de logement AADL au niveau des différentes wilayas, outre la réalisation de près de 700 établissements éducatifs (trois cycles) qui seront distribués progressivement à compter du mois d'août prochain.

Le polygone suivant illustre les prévisions de l'état du parc résidentiel jusqu'à 2030 :

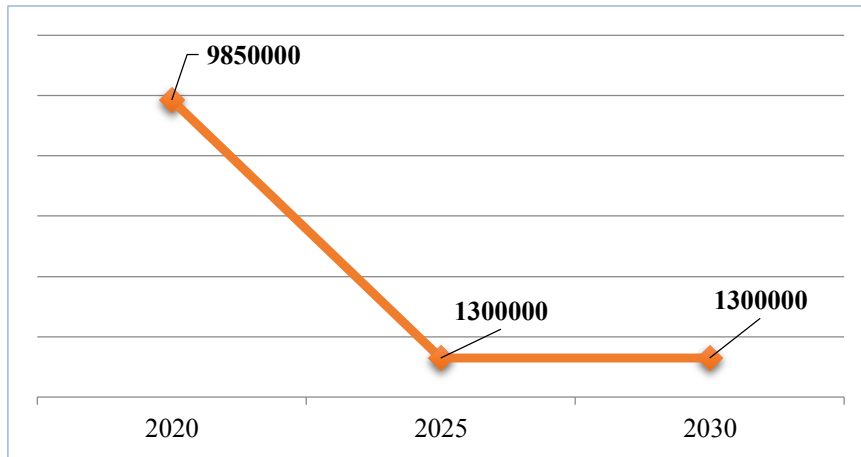


Figure II. 7. Le parc résidentiel en Algérie à l'horizon 2030

## II.3. Structure de l'habitat en Algérie

### II.3.1. L'habitat rural

L'Habitat Rural est un programme d'aide de l'Etat destinée aux personnes physiques qui exercent ou résident en milieu rural, voulant construire une nouvelle habitation.

Le logement rural s'intègre dans le cadre de la politique de développement rural, il a pour objectif la promotion des espaces ruraux et la fixation des populations locales. Il consiste à encourager les ménages à réaliser, en auto-construction, un logement décent dans leur propre environnement rural.

Des statistiques sur les logements réalisés dans la période 1999-2009 se résument comme suit :

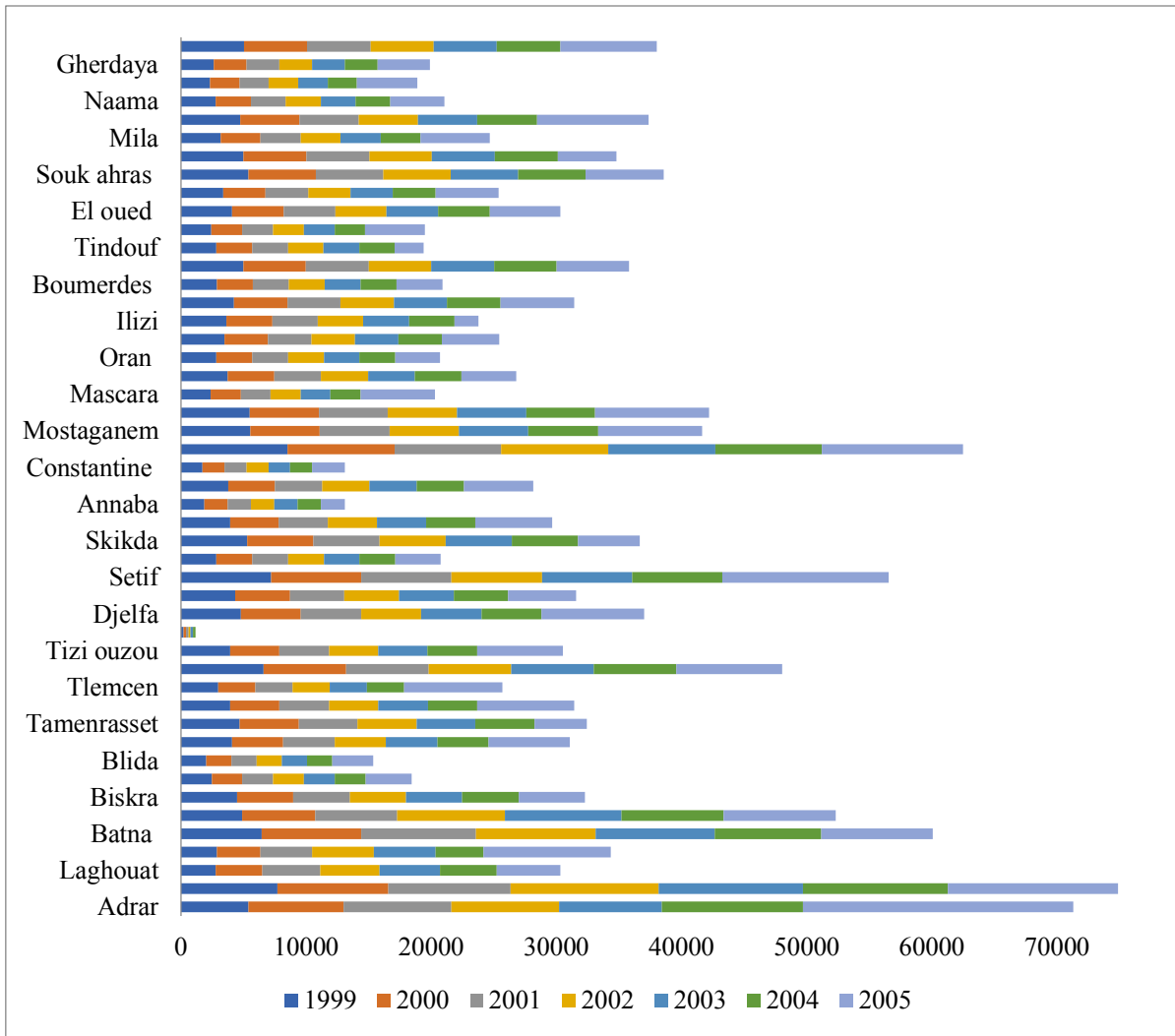


Figure II. 8. Habitat Rural : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés) par Wilaya - Tous programmes confondus - Années 1999 à 2005 (Source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)

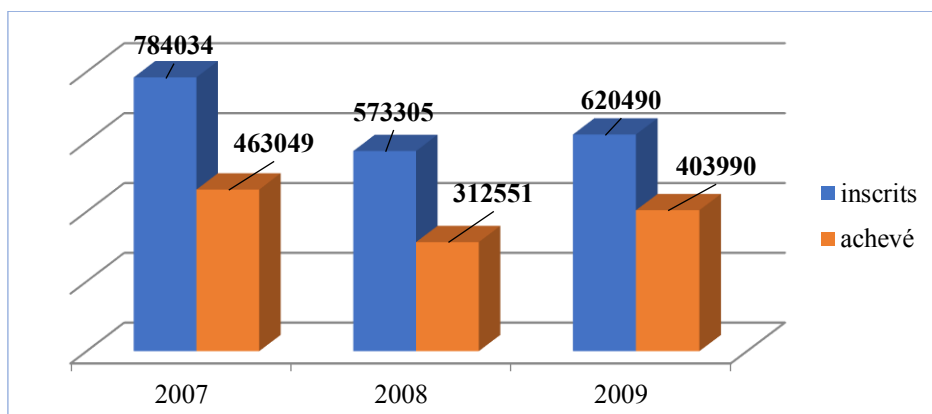
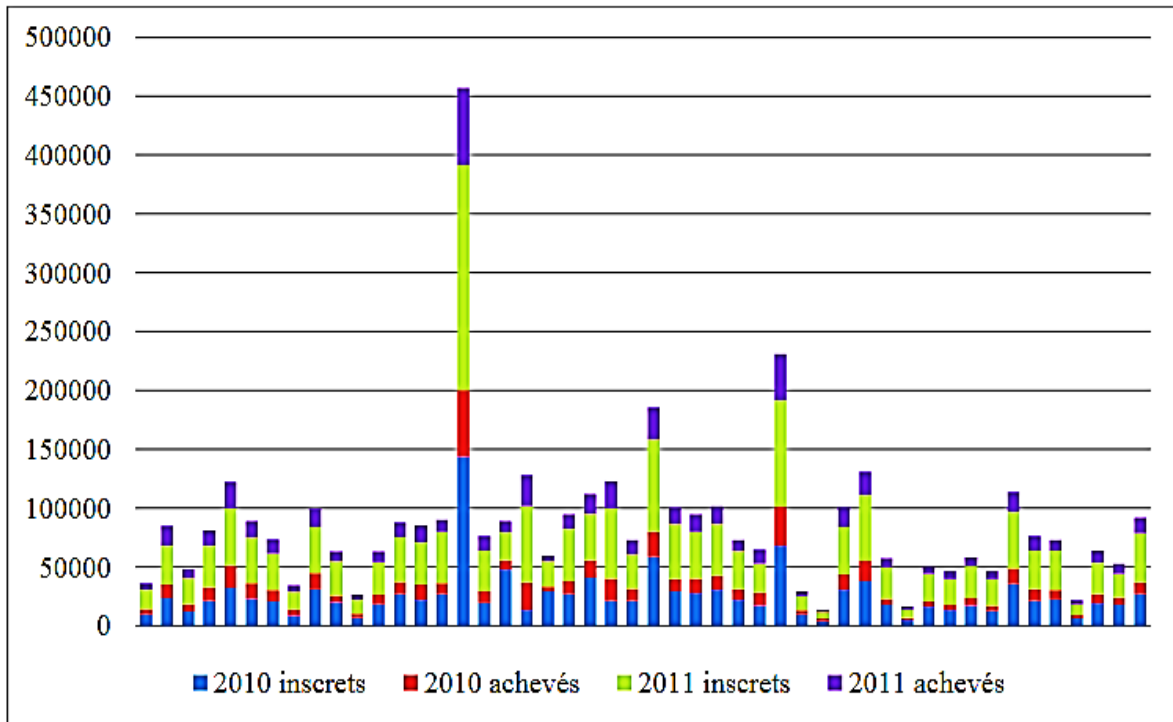


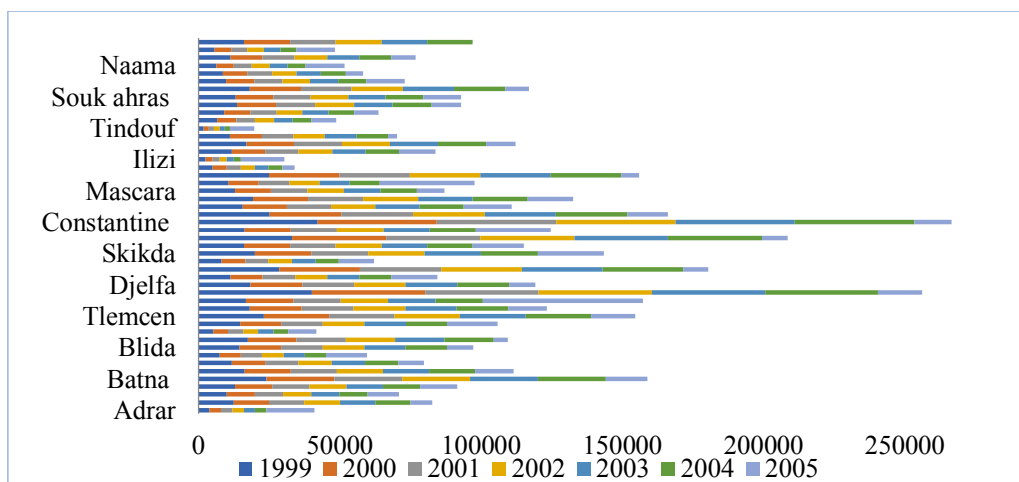
Figure II. 9. Habitat Rural : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés) en Algérie - Tous programmes confondus - Années 2007 à 2009 (Source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)



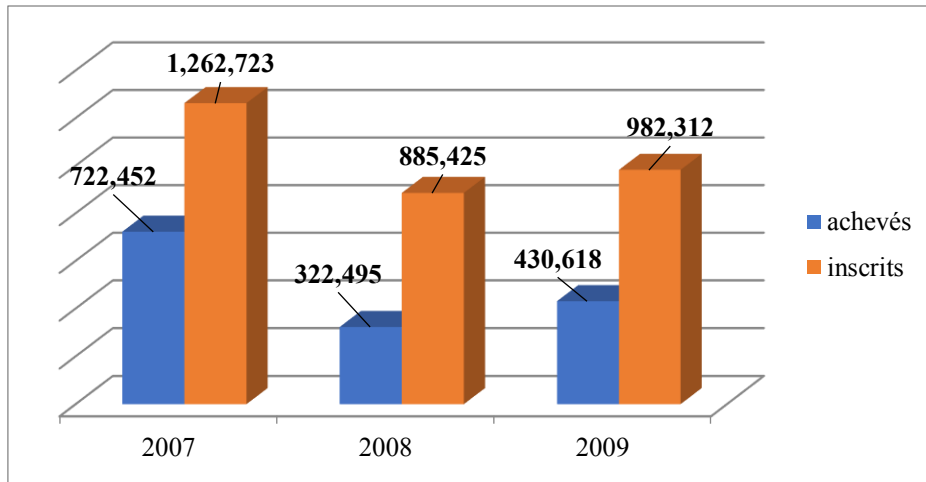
**Figure II. 10.**Habitat Rural : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (Achèvements cumulés) par Wilaya -Tous programmes confondus -Années 2010 à 2011 (Source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)

### II.3.2.Habitat urbain

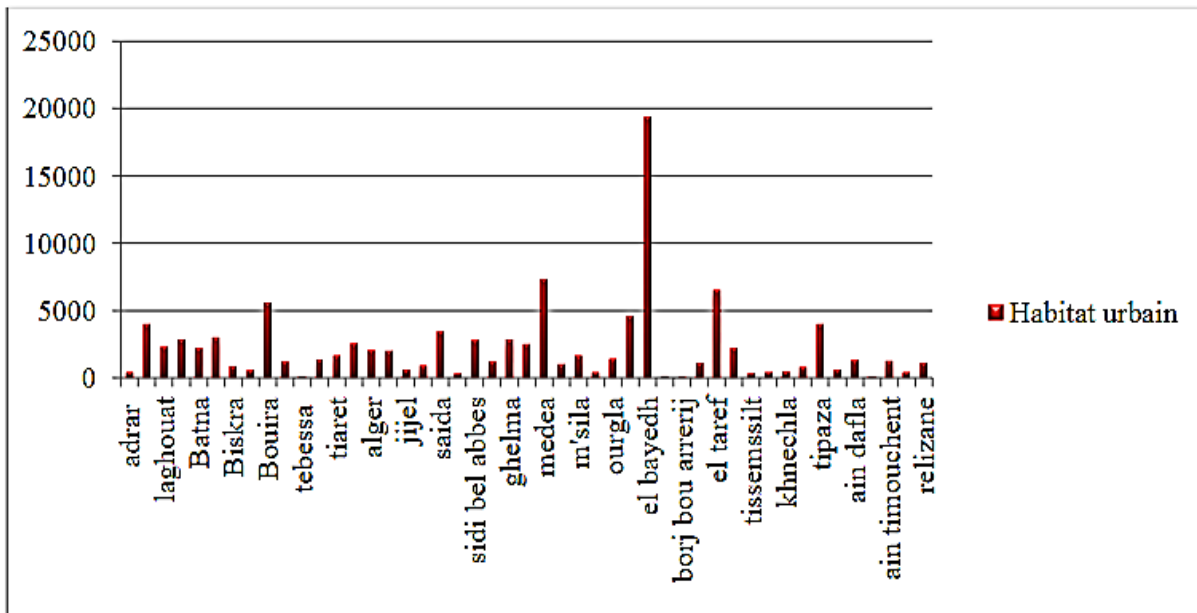
L’expansion des grandes opérations d’habitat n’a pas épargné les villes des pays les moins développés et l’Algérie n’en a pas échappé. Depuis les années 90 sous la pression exacerbée de la crise de logement, le gouvernement algérien fut entamé des programmes pour but de diminuer cette crise considérant comme outils « l’urbanisation des zones ».



**Figure II. 11.**Habitat Urbain : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés) par Wilaya - Tous programmes confondus - Années 1999 à 2005 (Source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)



**Figure II. 12.** Habitat Urbain : Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés en Algérie - Tous programmes confondus - Années 2007 à 2009 (Source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)

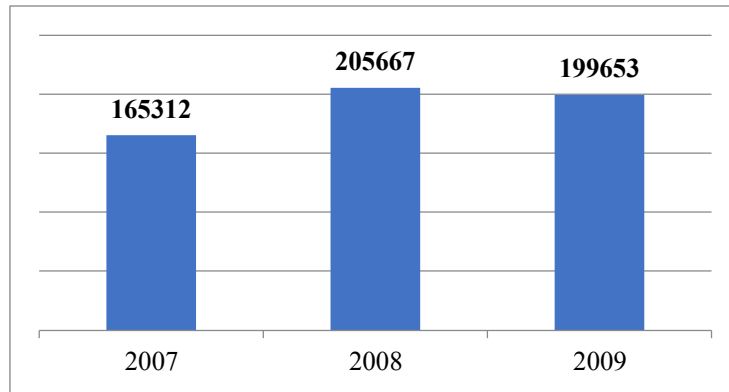


**Figure II. 13.** Habitat Urbain : Répartition des logements urbain inscrits par Wilaya –Tous programmes confondus – Année 2012 (Source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)

**NB :** Année 2008 : Les inscriptions et les achèvements de logements à fin 2008 concernent la période 2004 – 2008. Observation : Pour inscription, il est à signaler des programmes non encore affectés : Programme quinquennal CNEP (location – vente) de 40 770 logements

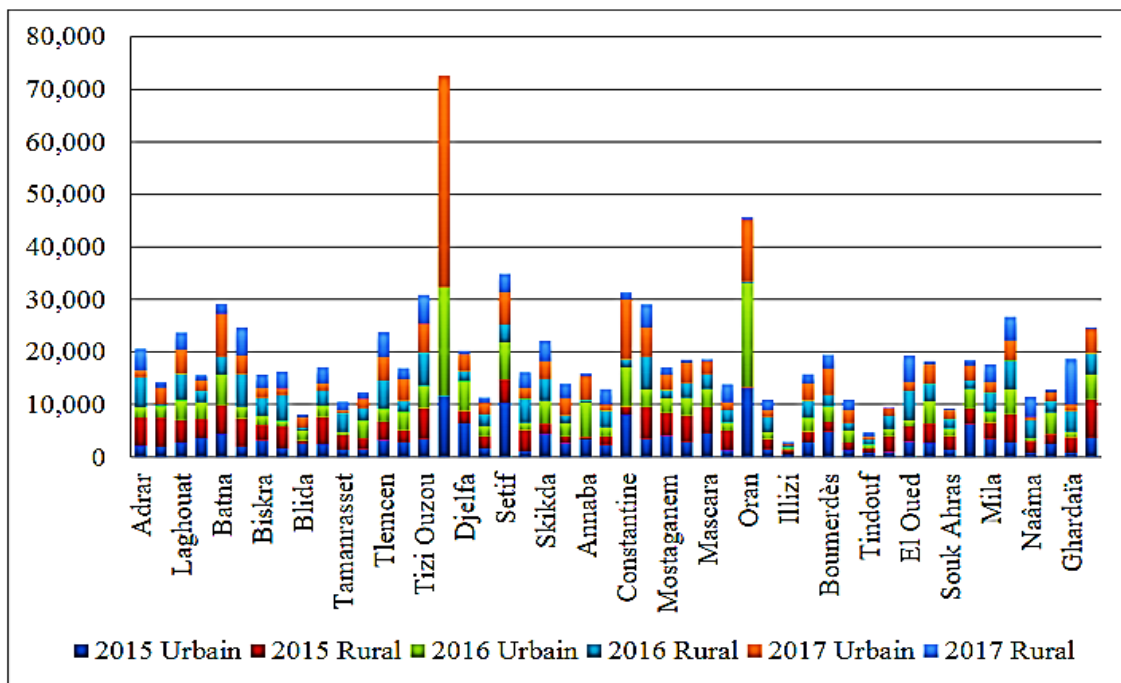
D’après les statistiques représentées dans ces six figures on note que : Le nombre des logements inscrits sont supérieurs à celui des logements achevés à cause d’un manque important dans le domaine de la réalisation au courant avec les programmes déjà annoncés.

L’Algérie a connu aussi une augmentation importante dans le domaine d’immobilier, la naissance des programmes hors construction a eu lieu en 2007, l’ONS offre les chiffres suivants :



**Figure II. 14.** Répartition des livraisons de logements en Algérie 2007-2009 (Hors auto construction) (Source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)

L’Algérie à partir de 2015 a connu une autre phase de développement de l’immobilier parlant des logements hors construction l’ONS affirme :



**Figure II. 15.** Répartition des logements urbain et rural livrés par wilaya (hors auto construction) –Tous programmes confondus de 2015 à 2017 (Source : Ministère de l’habitat et de l’urbanisme)

## II.4. État du secteur résidentiel en Algérie

Les constructions Algérie sont beaucoup plus nostalgiques, la majorité du parc résidentiel a été mise en place dans un temps passé et la cadence du développement s’est retardé ces dernières années, les types d’ouvrages sont distingué dans le tableau suivant :

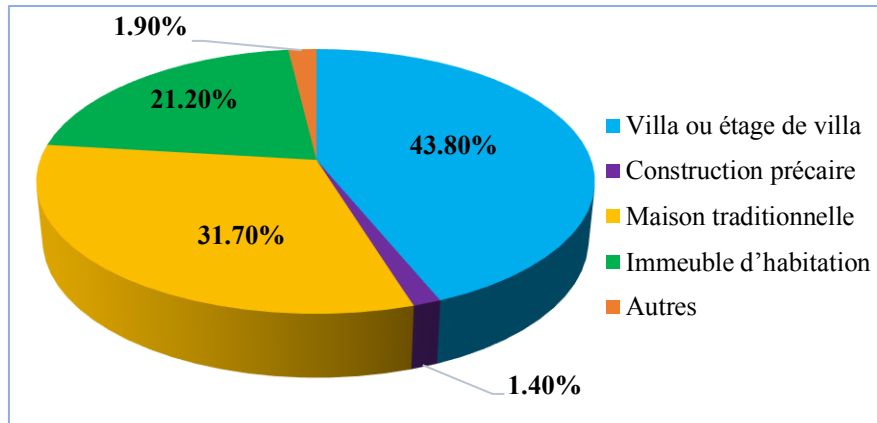


Figure II. 16. Type de construction résidentiel en Algérie (ONS, 2014)

## II.5. La Démographie en Algérie

Ayant 48 différentes wilayas en janvier 2016, la population de l'Algérie est évaluée à 40,4 millions d'habitants contre 12,7 millions en 1965. En janvier 2019, la population algérienne est passé à 43 millions. L'année 2018 a été marquée par un volume de naissances vivantes dépassant le seuil d'un million de naissances pour la cinquième année consécutive ainsi qu'une augmentation significative du volume des décès. La population est répartie selon les catégories d'âge comme représenté le tableau et la figure suivants :

Tableau II. 2. Structure de la population par âge et par sexe (pour 10 000 personnes) au 01/07/2015 (Source : ONS, 2015)

Groupes d'âges	Masculin	Féminin	Ensemble
00-04 ans	602	570	1172
05-09 ans	493	464	957
10-14 ans	386	367	753
15-19 ans	398	381	779
20-24 ans	452	436	889
25-29 ans	480	471	951
30-34 ans	460	452	912
35-39 ans	382	375	757
40-44 ans	310	311	621
45-49 ans	268	270	538
50-54 ans	221	222	443
55-59 ans	179	178	357
60-64 ans	146	141	287
65-69 ans	98	98	196
70-74 ans	71	74	145
75-79 ans	56	60	116
80-84 ans	37	40	77
85 ans & +	25	26	51

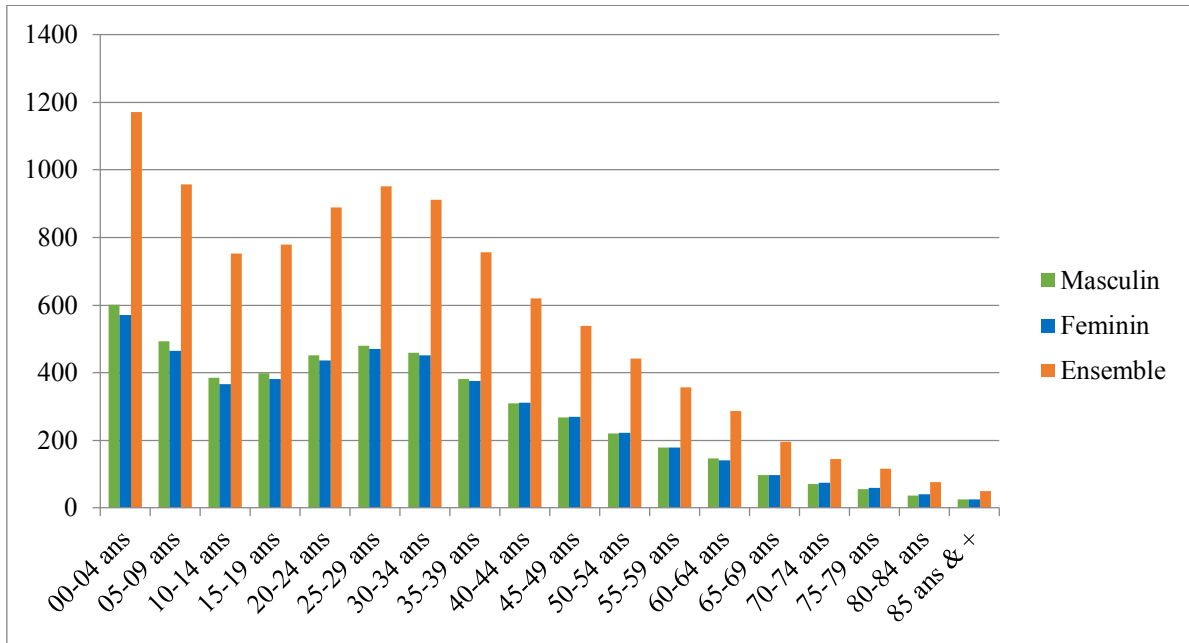


Figure II. 17. Structure de la population par âge et par sexe (pour 10 000 personnes) au 01/07/2015 (Source : ONS, 2015)

Dans la figure suivante on peut aussi voir que cette population n’est pas répartie équitablement sur le territoire national, la majorité se concentre dans l’ensemble tellien (Source : AND, 2014).

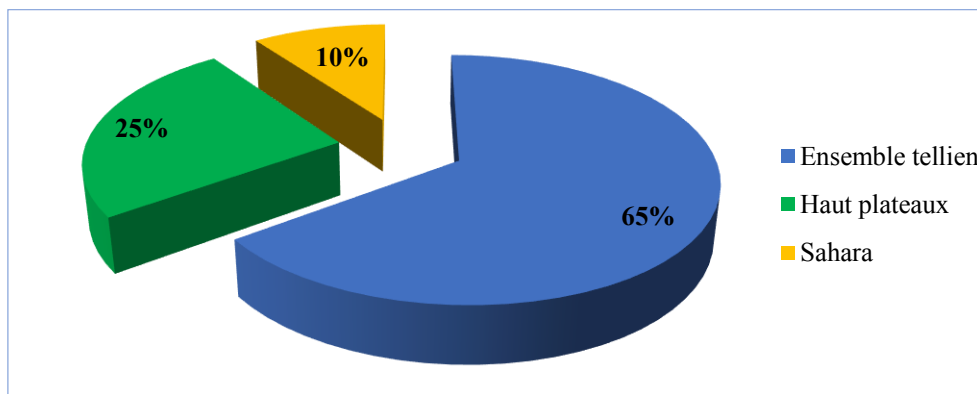
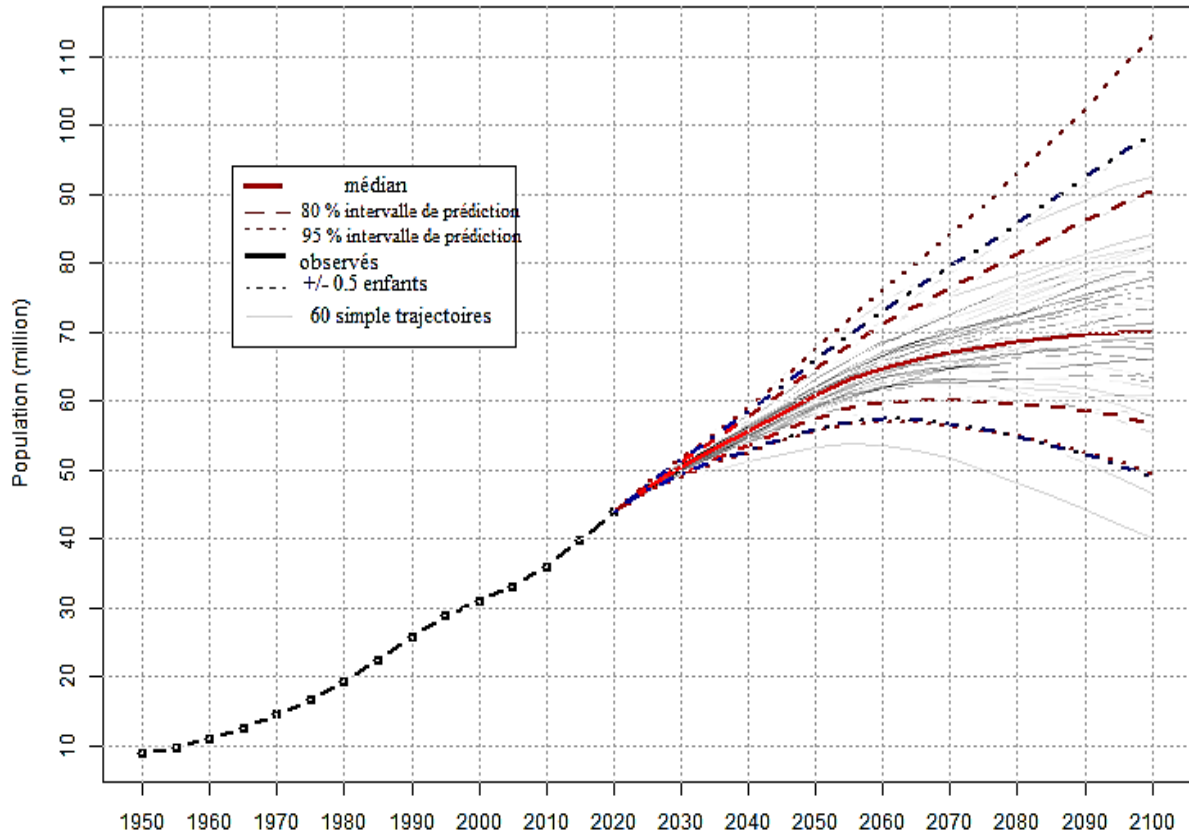


Figure II. 18. Répartition de la population sur le territoire (% / à la surface totale)

## II.6. Prévision de la population en Algérie 2020 – 2100

L’organisation Des nations unie estime que la population algérienne passera, d’après les projections, de 39 millions d’habitants en 2013 à 46,5 millions en 2025 avant de stagner autour des 55 millions d’habitants entre 1950 et 2100 (Figure II.18).



**Figure II. 19.** Prévision de la population en Algérie 1950 – 2100 (Source : [World population prospects 2019](#))

## II.7. Synthèse

Après l'indépendance du pays, en 1962, l'essentiel de l'effort du développement économique a été constitué par des investissements massifs effectués dans le secteur public de l'industrie, des infrastructures et des bâtiments ([MATE, 2011](#)).

Dans le secteur de l'habitat, grâce aux progrès qu'elle a réalisés, l'Algérie est classée parmi les pays qui ont largement satisfait aux "Objectifs du millénaire pour le développement" adoptés par les Nations Unies. Le gouvernement a affirmé sa volonté de maintenir cet engagement au double plan quantitatif et qualitatif, pour résorber définitivement le déficit de logements dans le pays ([Moussaoui, 2018](#)).

## Partie 02

# Sismicité de l'Algérie

---

### II.8. Introduction

La connaissance de l'histoire des séismes, qui ont secoué une région, est importante dans le processus d'établissement de critères d'analyse de la vulnérabilité comme la réponse des structures et l'intensité des secousses. L'activité sismique du Nord Algérien, où se concentre 89% de la population Algérienne selon l'office nationale des statistiques est continue puisqu'elle se produit tout le long de l'année (CRRAG, 2001).

### II.9. Historique de la sismicité de l'Algérie

L'historique de la sismicité, qui correspond aux séismes décrits dans les récits historiques et autres archives avant la période instrumentale, s'avère être une importante source de renseignement quant à la position probable et approximative de failles actives. Rappelons pour mémoire que l'avènement de l'instrumentation sismique se fit en Algérie dans les années 1910, mais que les sismomètres ne sont utilisés de manière fiable et systématique (car devenus assez nombreux) que bien plus tard, dans les années 1970.

Historiquement, l'Algérie est connue pour être une zone sismique très active. Le catalogue de sismicité historique (Bennouar, 1994 ; CRAAG, 1994) ne couvre qu'une infime partie de l'histoire de la sismicité de cette région. Les investigations de paléo sismicité effectuées après le séisme d'El Asnam ont permis de révéler l'existence de traces d'anciens séismes ont affecté cette région (Meghraoui, 1988).

Ces travaux ont montré l'existence de plusieurs séismes importants avec rupture en surface ( $M_s > 6,5$ ) ayant affecté la région depuis au moins 600 ans environ (MHAT, 2004). Ces données de paléo sismicité permettent également d'estimer la récurrence des événements sismiques qui ont affecté cette région.

Du point de vue de l'histoire, l'activité sismique en Algérie du Nord est connue depuis le 02 Janvier 1365 date à laquelle s'est produit le séisme d'Alger (Al Suyuti, 1505 ; Ambraseys,

1988). Antérieurement à cette date, seulement deux séismes ont pu être recensés, touchant les villes de : (Sétif 419 et Ain-Temouchent 699). Durant l'époque romaine (CRAAG, 2006).

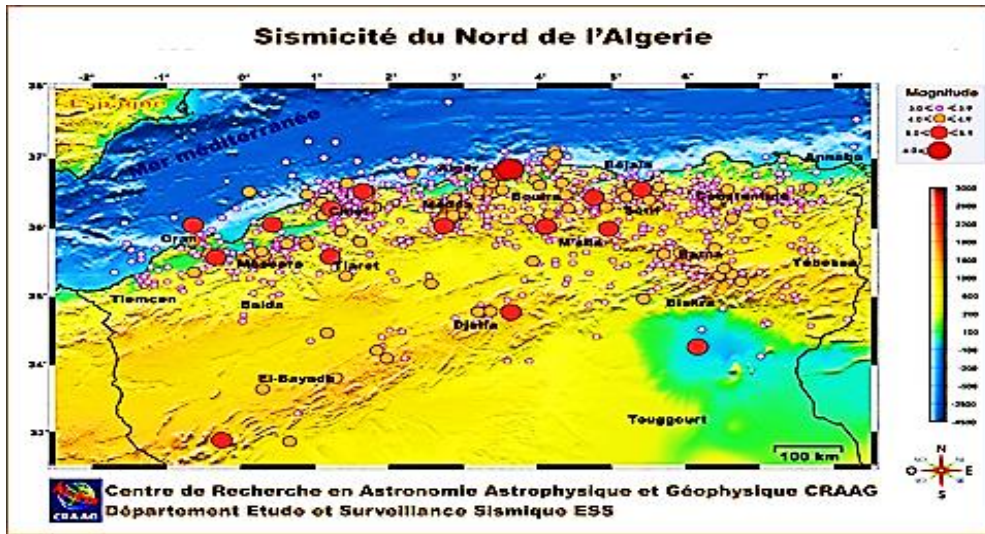


Figure II. 20. Carte de sismicité du nord algérien (Source : CRAAG)

## II.10. Le contexte tectonique

L'Algérie se situe sur une frontière active de convergence des plaques de l'Afrique et de l'Eurasie (Figure II.20). Ces plaques se rapprochent à une vitesse de l'ordre de 6 millimètres par an entraînant la déformation des bordures septentrionale et méridionale des deux plaques majeures suscitées, conduisant à la formation des chaînes de montagnes atlasique et alpine. Cette déformation génère l'existence de nombreuses failles active qui jalonnent les régions atlasiques du pays. Le déplacement rapide des bords de la faille génère alors des ondes sismiques qui se propagent jusqu'à la surface. Les principales failles active sont localisées au niveau de la chaîne de montagnes nord-africaine (atlas) (Cherifi, 2016).



Figure II. 21. Déplacement tectonique des plaques de l'Afrique et de l'Eurasie (Source : nocquet, 2002)

## II.11. Caractéristiques de la sismicité Algérienne

L'étude des séismes de ces deux dernières décennies a montré que ces derniers se produisant en Algérie sont en général faible à modérés (Figure II.21). Les séismes algériens sont d'autre parts superficiels ne dépassent pas en profondeur les 15 km, ce qui les rends plus perceptibles par la population et donc plus dangereux. Cette activité se concentre essentiellement dans la région nord du pays ; la région tellienne est la plus active. Le zonage effectuée indique que les régions d'El Asnam, Oran et Alger sont les plus menacées. On remarque également que l'activité sismique est plus intense dans la région-est du pays que dans les régions centre ou ouest. Certains types de formations géologiques (terrain meuble, formations récentes peu compactées) peuvent également être à l'origine d'amplifications du mouvement du sol lors d'un séisme (effet du site)

La catastrophe d'El Asnam (10 octobre 1980,  $M=7.3$ ) a permis de démontrer scientifiquement que de violents séismes pouvaient se produire en Algérie du nord et qu'il fallait se munir de normes de construction parasismiques et se doter d'une politique de réduction du risque. Les nombreuses études d'aléas sismiques, entreprises depuis les années quatre-vingt, ont permis de caractériser la sismicité (fréquence, intensité...) et d'élaborer les cartes de sismicité de l'Algérie du nord. Les informations recueillies sont d'une extrême importance pour un meilleur aménagement du territoire et pour la réduction du risque sismique.

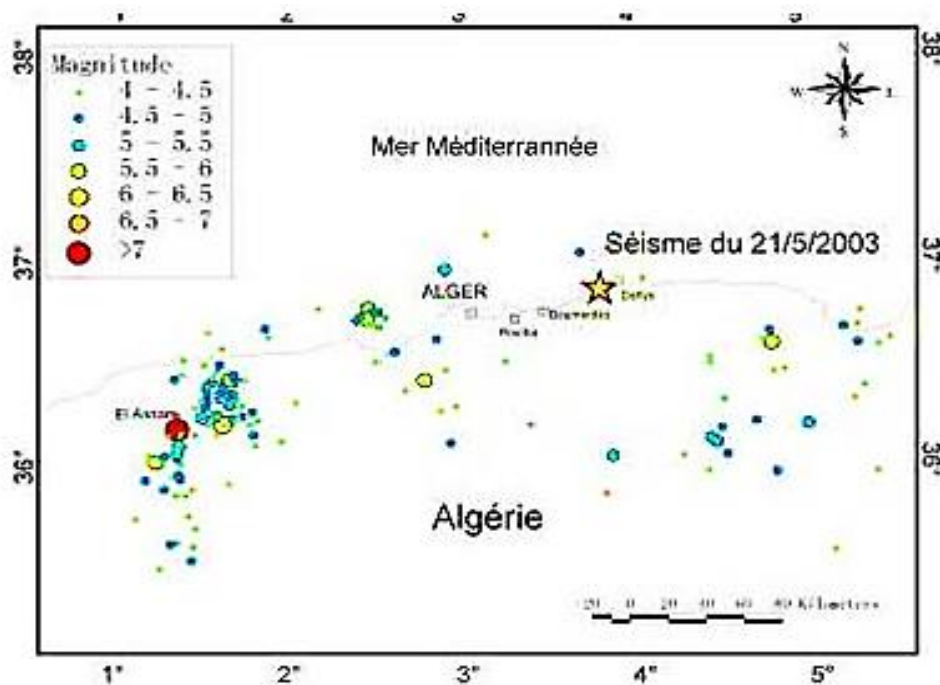


Figure II. 22. La sismicité de l'Algérie (source : US Geological Survey USGS)

## II.12. La vulnérabilité du nord algérien

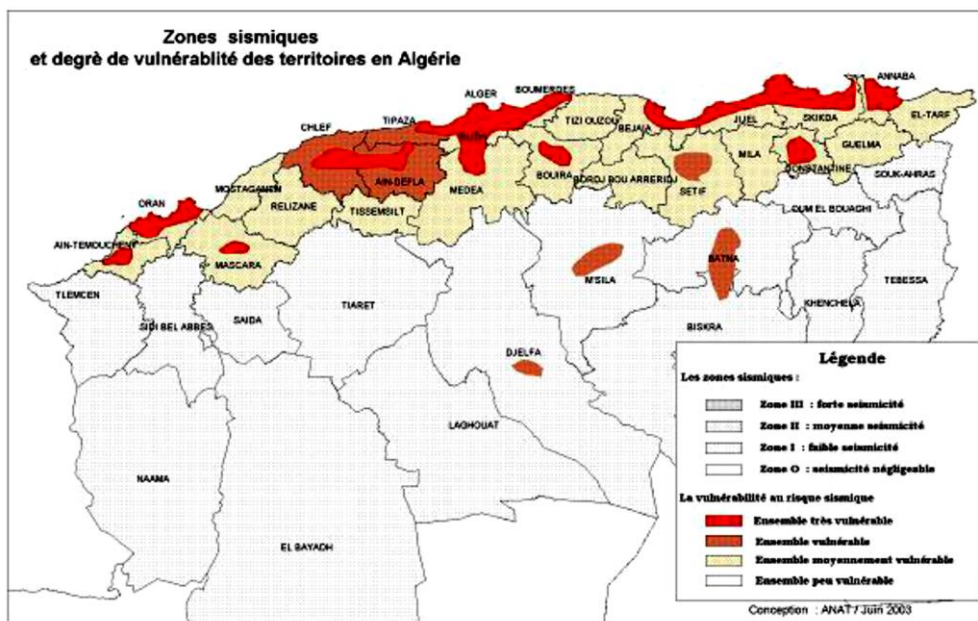
Le zonage sismique du territoire algérien montre comme vu auparavant, que la bande tellienne notamment dans sa frange littorale est soumise au degré d'aléa sismique le plus élevé. La carte proposée par le CRAAG la classe en niveau 3, alors que les Hauts Plateaux et le Sud sont positionnés respectivement en niveau 2 et 1.

Comme l'occupation de notre territoire est très déséquilibrée, la vulnérabilité de la frange tellienne par rapport aux effets des risques majeurs et notamment sismique, est évidemment accrue pour les zones fortement urbanisées où se concentrent également les complexes industriels, des infrastructures et équipements structurants, les activités de commandement économique (tertiaire supérieur).

C'est à partir de la conjugaison du niveau d'exposition à l'aléa sismique et de la concentration démographique et économique ainsi exposée à l'aléa qu'a été élaborée la carte relative au niveau de vulnérabilité des différents ensembles de notre territoire par rapport aux effets des événements sismiques.

Cette carte individualise ainsi, les grandes concentrations humaines et économiques de la zone tellienne liées au plus haut niveau de vulnérabilité et, quelques ensembles des Hauts Plateaux, où l'occurrence d'événements sismiques associée à des concentrations urbaines crée un second niveau de vulnérabilité.

La situation extrême en termes de vulnérabilité est évidemment offerte par l'aire métropolitaine d'Alger, qui outre sa charge démographique particulière (plus de 12% de la population algérienne) concentre un potentiel économique et infrastructurel considérable, ainsi que tous les centres de pouvoir et de commandement du pays.



**Figure II. 23.** Zones sismiques et degré de vulnérabilité des territoires en Algérie (Source : M.H.A.T. rapport Risque sismique et redéploiement des activités et de l'urbanisation)

## II.13. Les séismes majeurs en Algérie

En étant une région à forte sismicité, au cours de son histoire l'Algérie a subi plusieurs séismes destructeurs, parmi les plus notables on peut citer :

**Tableau II. 3.** Les séismes majeurs en Algérie

Lieu	Date	Intensité max	Magnitude	Victimes	Observations
Alger	03.01.1365	Forte	Forte	Plusieurs	<b>Destructeur</b> : Alger complètement détruite. 100 répliques pendant la nuit. Une partie d'Alger fut inondée
Oran	09.10.1790	X	6.5-7.5	2000	Dégâts au pied des monts de Murdjadjo, trois importantes répliques ressenties à Malte
Blida	02.03.1825	X	7.5	7000	Destruction à Blida et peu de dégâts à Alger
Djidjelli	22.08.1856	X	7.5	/	Un raz- de marrée a été observé le long du littoral (Alger, La Calle, Nice, St Pierre de Sardaigne, Mahon). Le choc principal a détruit les ¾ des habitations à Djidjelli et le reste de la ville a connu de sérieux dégâts. Des répliques ont été ressenties jusqu'en Octobre. La réplique la plus importante a atteint une intensité 10=VII
El Kalaâ	29.11.1887	IX-X (VIII)	6.5-7.5	20	Destructeur : El Kalaâ et Dehba : une mosquée ainsi que plusieurs maisons ont été détruites. Thimouchanet: importants dégâts (80 maisons ont été complètement détruites). Ressenti à Oran, Arzew, Relizane, Mostaganem et Mascara. Forte réplique ressentie quelques minutes après

Tableau II. 4. Les séismes majeurs en Algérie- Suite

Lieu	Date	Intensité max	Magnitude	Victimes	Observations
Gouraya	15.01.1891	X	7.5	38	Destructeur : dégâts importants : Gouraya et Villebourg ont été complètement détruites. 53 immeubles et maisons détruits ou endommagés. Dégâts à Cherchell, kherba, Blida, El-Affroun, Mouzaia, Miliana et Orléansville. Mouvement vertical observé à Gouraya. Ressenti à Saida et Djelfa. Fortes répliques. Rayon macrosismique 200 kms
Béjaia	12.02.1960	VIII-IX	5.6	264	1000 maisons détruites et 112 Blessés
Chlef (orléansville-el Asnam)	09.09.1954	X-XI	6.7	1243	Destructeur : 20.000 habitations détruites. Effets observés : glissement de terrain et liquéfaction du sol. Mouvement vertical maximum (10) (1.33m) au voisinage de Ouled Abbas. Plusieurs répliques FM : 254,30,266.
Chlef	10.10.1980	IX	7.5	2633	Destructeur : 8369 blessés, 348 portés disparus, 6.778.948 sinistrés(*), 70% des habitations détruites. Une faille inverse sismogène a été observée (36km) Un mouvement vertical maximum (11) de 6 m a été mesuré entre Zebabdja et Ouled-Abbas Une forte réplique a été enregistrée une heure après le choc Principal (M=6.5)
Constantine	27.10.1985	VIII	5.9	10	Peu de dégâts à El-Aria et Béni-Yakoub, plus de 300 blessés, plusieurs au voisinage du village d'El-Khroub. Ruptures de surface. Une faille de Coulissage. Plusieurs répliques pendant plus d'un mois. FM 217,84,19 ,5.2 1024
El affroun	31.10.1988	VII	5.4	Aucun	Nombreux dégâts.500 familles sinistrées et 5 blessés

Tableau II. 5. Les séismes majeurs en Algérie- Suite

Lieu	Date	Intensité max	Magnitude	Victimes	Observations
Dj. Chenoua	29.10.1989	VIII	6	22	Nombreux dégâts à Sidi-Moussa (près de la ville de Tipaza) (au voisinage de l'épicentre) et Nador. Peu de dégâts à Alger ( la Casbah). Faille inverse. Plusieurs répliques durant 3 mois. FM: 246, 56, 86, 8.0 1024
Mascara	18.08.1994	VII	5.6	/	Ce séisme, survenu la nuit, a été largement ressenti, l'intensité VII a été atteinte à Hacine et Shadlia, ou d'importants dégâts ont été occasionnés, des destructions ont été observés dans les villages avoisinants et ceci sur un rayon de 15 km autour de Hacine.
Alger	04.09.1996	VII	5.7	/	Ce séisme qui a été ressenti jusqu'à Dellys à l'Est, Menaceur à l'Ouest et Berrouaghia au Sud, a atteint l'intensité VII à Ain-Benian, Cheraga et Staoueli, appartenant à la région épiscopentrale. Le rayon macrosismique moyen est de 140 km .
Ain-timouchent	22.12.1999	VII	5.8	5	Ce séisme a atteint une intensité maximale de VII a occasionné dans la région Pléistoseiste qui regroupent Ain-Témouchent, Ain-Tolba, Ain-Kihal et Sidi-Ben-Adda , des dégâts matériels importants et la perte de plusieurs vies humaines , la surface macrosismique dépasse 260 km de rayon.
Beni-ouartilane	10.11.2000	VII	5.4	2	Ce séisme a occasionné dans la région pleistoseiste qui regroupe Béni-Ouartilane, Fréha et El-Main, des dégâts matériels et la perte de 02 vies humaines. Des fissurations superficielles des maisons en maçonneries traditionnelle ont été observées dans les localités citées ci-dessus.

**Tableau II. 6.** Les séismes majeurs en Algérie- Suite

Lieu	Date	Intensité max	Magnitude	Victimes	Observations
Zemmouri (alger-boumerdas)	21.05.2003	X	6.8	2278	Destructeur Ce séisme a occasionné dans la région épicerale qui regroupe principalement : BOUMERDES, ZEMMOURI, CORSO, TIDJELABINE, REGHAÏA, THENIA, BORDJ MENAÏL, SIDI DAOUD et DELLYS des dégâts très importants. Des immeubles et des maisons récemment construites ont été complètement détruits ou endommagés. On déplore aussi plusieurs milliers de blessés et 2278 morts. La localité de ZEMMOURI ville reste celle qui a subi le plus grand nombre des dégâts. Ce séisme, survenu en début de soirée (18h 44 Gmt) a été largement ressenti, à l'Est jusqu'à GUELMA, à l'Ouest jusqu'à Mostaganem, au Sud jusqu'à BISKRA et au Nord jusqu'aux larges des côtes espagnoles et françaises
Msila	14.05.2010		5.2	2	Le 14 Mai 2010, une secousse tellurique a frappé la commune de Béni Ilman située à 70 kms au nord-ouest du Chef-lieu de la Wilaya de M'Sila .Cet évènement a causé la mort de trois personnes, une quarantaine de blessés et a détérioré plusieurs constructions

## II.14. L'action sismique dans le règlement algérien

Le tremblement de terre d'Orléans ville (1954) « Actuellement Chélif » ont conduit les autorités de l'époque à préconiser dès 1955 des recommandations techniques provisoires dans le but d'atténuer les effets des séismes sur la stabilité des constructions. Ces recommandations sont connues sous le nom AS. 55. A cette époque deux zones avaient été définies pour l'Algérie :

- Zone A : faible sismicité
- Zone B : forte sismicité.

Le nord de l'Algérie de la frontière Marocaine à frontière Tunisienne était considéré en zone B. Après le séisme de chlef (1980) de nouvelles règles ont été établies sur le modèle américain. Il s'agit du règlement RPA. 99.

### II.14.1. Classification des zones sismiques

Le territoire algérien est divisé en 4 zones de sismicité croissante :

- Zone 0 : sismicité négligeable ;
- Zone I : sismicité faible ;
- Zone IIa et IIb : sismicité moyenne
- Zone III : sismicité élevée.

**Tableau II. 7.** Classification sismique des wilayas d'Algérie

Wilaya	Zone O	Zone I	Zone II		Zone III
			IIa	IIb	
1. Adrar	X				
2. Chlef					X
3. Laghouat		X			
4. Oum el bouaggi		X			
5. Batna		X			
6. Bejaia			X		
7. Biskra		X			
8. Bechar	X				
9. Blida					X
10. Bouira			X		
11. Tamenrasset	X				
12. Tebessa		X			
13. Tlemcen		X			
14. Tiaret		X			
15. Tizi ousou			X		
16. Alger					X
17. Djelfa		X			
18. Jijel			X		
19. Setif			X		
20. Saida		X			
21. Skikda			X		

Tableau II. 8. Classification sismique des wilayas d’Algérie - Suite

Wilaya	Zone O	Zone I	Zone II		Zone III
			Ia	Ib	
22. Sidi bel abbes		X			
23. Annaba			X		
24. Guelma			X		
25. Constantine			X		
26. Médéa				X	
27. Mostaganem			X		
28. M’sila			X		
29. Mascara			X		
30. Ouargla	X				
31. Oran			X		
32. El Bayadh		X			
33. Illizi	X				
34. Bordj Bou Arreridj			X		
35. Boumerdes					X
36. El Taref			X		
37. Tindouf	X				
38. Tissemsilt			X		
39. El oued	X				
40. Khenchla		X			
41. Souk Ahras		X			
42. Tipaza					X
43. Mila			X		
44. Ain defla			X		
45. Naama		X			
46. Ain Temouchent			X		
47. Ghardaïa	X				
48. Relizane					X

### II.14.2. Classification des sites

Les sites sont classés en quatre (4) catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent :

- S1 : Site rocheux ( $V_s > 800$  m/s) ;
- S2 : Site ferme : sol raide formé par des dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile sur consolidée sur 10 à 20 m d'épaisseur ( $V_s > 400$  m/s, à partir de 10 m de profondeur) ;
- S3 : Site meuble : dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide ( $V_s > 200$  m/s, à partir de 10 m de profondeur) ;
- S4 : Site très meuble : + dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couche d'argile molle ( $V_s < 200$  m/s, dans les 20 premiers mètres) + Ou dépôts d'argile molle à moyennement raide ( $V_s < 200$  m/s, dans les 20 premiers mètres).

### II.14.3. Classification des ouvrages :

Quatre groupes de construction sont définis en fonction de leur usage avant, pendant et après un fort séisme :

- **Groupe 1A** : ouvrages d'importance vitale devant demeurer opérationnels après un séisme majeur (centres de décision, hôpitaux, police, gendarmerie, installations militaires, de télécommunication, de stockage d'eau ...) ;
- **Groupe 1B** : ouvrages de grande importance (bâtiments publics, scolaires, universitaires, ...) ;
- **Groupe 2** : ouvrages courant ou d'importance moyenne (habitation, bureaux ...) ;
- **Groupe 3** : ouvrages de faible importance

Le coefficient d'accélération,  $A$ , est fonction du groupe de bâtiments concerné et de la zone sismique correspondante :

**Tableau II. 9.** Coefficient d'accélération ([rapport préliminaire de la mission AFPS version 8 juillet 2003](#))

Groupe	Zone		
	I	II	III
1A	0.12	0.25	0.35
1B	0.10	0.20	0.30
2	0.08	0.15	0.25
3	0.05	0.10	0.15

A chaque type de site est associé un spectre de réponse en accélération en considérant les périodes caractéristiques suivantes :

**Tableau II. 10.** Paramètres des spectres de réponse en accélération

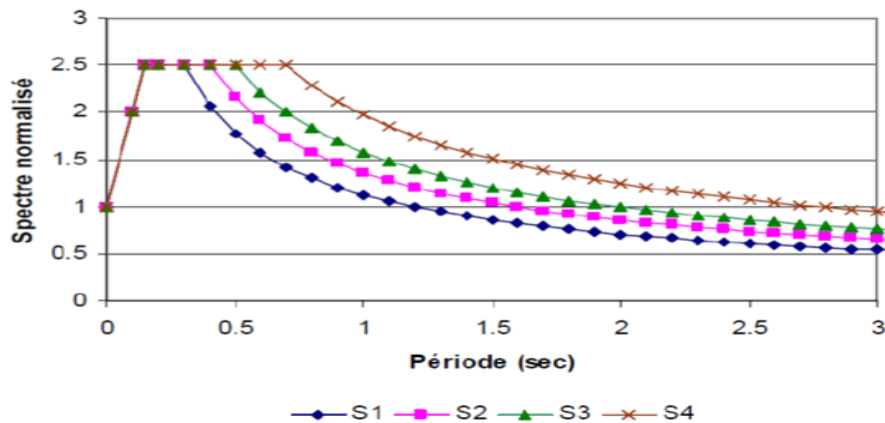
Site	S1	S2	S3	S4
T1 (sec)	0.15	0.15	0.15	0.15
T2 (sec)	0.30	0.40	0.50	0.70

La forme du spectre élastique normalisé en accélération en fonction de la période  $T$ , pour un amortissement critique de 5% et sans tenir compte ni du type ni de la qualité de l'ouvrage se calcul à l'aide des relations suivantes :

$$1.25 * A * \left(1 + \frac{1.5 * T}{T_1}\right) \quad 0 \leq T \leq T_1$$

$$2.5 * (1.25 * A) \quad T_1 \leq T \leq T_2$$

$$1.25 * A * \left(\frac{T_2}{T}\right)^{\frac{2}{3}} \quad T_2 \leq T \leq 3.0s$$



**Figure II. 24.** Spectres de réponse élastiques normalisés pour les 4 types de sites (Source : RPA 99 V.2003)

## II.15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu que le risque sismique en Algérie est prépondérant, en particulier pour les régions nord du pays. En effet, l'étude de la sismicité de l'Algérie montre que les séismes importants ont souvent occasionné des dégâts importants et entraîné la perte de milliers de personnes.

Cette même région est la plus peuplée avec une concentration de la population de plus de 65% de la population totale. En plus de cette situation d'exposition de la population au risque sismique, l'état des constructions accentue le risque en cas de survenance de secousses sismiques.

Toutes ces données fondent aujourd'hui l'évaluation de la performance sismique des bâtiments d'habitation en Algérie une nécessité. Ceci fera l'objet du chapitre III

# Proposition d'une méthodologie d'évaluation de la performance sismique des bâtiments d'habitation en Algérie

*Le chapitre suivant se priorise dans notre travail a cause de son importance dans notre étude. Un chapitre qu'on a devisé en deux parties. La premiere c'est la definition de deux approches qui construisent notre méthodologie d'évaluation (top down, buttom up) successivent expliqués, TOP DOWN consiste a diviser notre problème à quelques problèmes plus simples connus sous nom de critères et indicateurs que leur performance sera évaluée . BUTTOM UP cest l'agregation des solutions de ces problems pour finir enfin a resoudre la racine de notre travail.*

*En seconde lieu. l'utilisation de la méthode AHP (analytic hierarchic process) pour l'appliquer sur notre cas d'étude (bâtiment a usage habitation).*

### III. 1. Introduction

Compte tenu de sa situation dans une zone de convergence des plaques tectoniques, l'Algérie est une région avec une sismicité élevée. Au cours de son histoire, il a subi à plusieurs tremblements de terre. Parmi les plus notables, le séisme de Chlef (1980), Ain-Temouchent (1999), et dernièrement celui de Boumerdès (2003). Le parc immobilier ancien, qui constitue une grande partie du parc immobilier en Algérie, est le plus vulnérable et qui présente le plus grand risque d'effondrement dans un tremblement de terre. Nous essayons, de faire un vrai diagnostic et de définir une note de performance sismique (indice de performance sismique (IPs)) qui refléterait la qualité sismique de bâtiments résidentiels en Algérie. Pour cela, nous avons assemblé les différents objectifs et critères de durabilité dans un tableau de bord. Ces aspects contribuent, dans le dernier, à l'élaboration de l'indice de performance sismique. Cette méthodologie est principalement basée sur la définition, le calcul, l'évaluation et l'agrégation des indicateurs de performance avec la méthode AHP. La méthodologie sera intégrée dans un outil d'aide à la décision pour répondre à la demande des managers dont la politique devrait être orienté vers la conception de bâtiments durables.

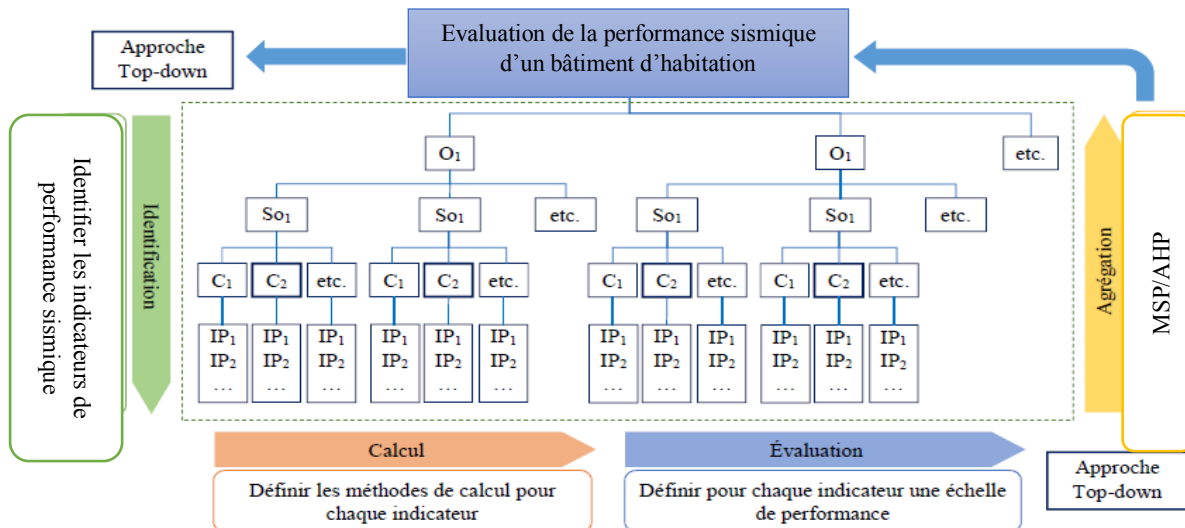
### III. 2. Méthodologie proposée

#### III.2. 1. Structure de la méthodologie

La méthode que nous proposons utilise des objectifs représentant les aspects principaux du projet quantifiés suivant un schéma descendant. Chaque objectif d'un projet de bâtiment d'habitation est évalué par l'intermédiaire d'un ensemble de critères et d'indicateurs de performance (IPs) pour ensuite être agrégé dans un processus ascendant. Les approches descendantes permettent aux experts de définir le cadre de durabilité et ses indicateurs. Les approches ascendantes permettent la participation des parties prenantes à un tel processus (Singh et al., 2008; Waas et al., 2014).

La première approche "Top-down" (Figure III.1) suit la logique suivante :

1. Fixer un objectif ;
2. Définir, pour chaque objectif, des sous objectifs ;
3. Identifier, pour chaque sou objectif, des critères éventuels pouvant contribuer à son évaluation ;
4. Identifier, pour chaque critère des indicateurs qui vont contribuer à son évaluation ;
5. Élaborer, pour chaque indicateur, une (ou des) méthode(s) d'évaluation ;
6. Définir des méthodes d'appréciation de la performance de l'indicateur (normes, fonctions, base de données, avis d'experts, etc.).



**Figure III. 1.** Méthodologie adoptée pour l'évaluation de la performance sismique pour un bâtiment d'habitation

Par opposition, l'approche ascendante "Bottom-up" (Figure III.1) présente l'avantage majeur de prendre en compte dès le départ les données disponibles, mais elle ne permet pas forcément d'obtenir un système d'objectif exhaustif et équilibré car elle est basée uniquement sur les données disponibles et non pas sur une vision exhaustive des attentes. Cette approche, ascendante, consiste, sur la base des performances des indicateurs, à élaborer et à comparer des modèles et/ou des méthodes pratiques et précises permettant d'évaluer les performances des critères de durabilité en remontant des simples indicateurs aux objectifs globaux associés.

### III.2. 2. Les approches TOP-DOWN et BOTTOM-UP : deux approches opposées ou complémentaires ?

Deux démarches s'opposent traditionnellement concernant la construction d'un processus d'évaluation : une démarche « experte », dite « top-down », basée essentiellement sur les sciences de l'environnement et de l'économie et une démarche « Bottom-up », fondée sur les sciences sociales et prônant une approche participative (Reed et al., 2006). Chacune à sa façon, ces deux approches ont essayé de répondre aux questionnements posés par l'évaluation de développement durable. Seulement, l'une comme l'autre présente des avantages et des limites.

### III. 3. Approche diagnostic descendante - "Top-down"

L'Approche diagnostique Top-down est une approche descendante de description des objectifs, qui consiste en un diagnostic approfondi de la performance sismique (DSP) des bâtiments existants. Ce diagnostic passe par l'identification et la définition de différents critères de durabilité, des plus globaux (« objectifs de performance ») aux plus détaillés (« indicateurs de performance »).

### III.3. 1. Identification des IPS

L'indice de performance sismique (IPS) pour les bâtiments, en particulier les anciens bâtiments, est un outil de décision fiable pour les ingénieurs du bâtiment en Algérie. L'élaboration d'un tel indice nécessite un diagnostic des différents paramètres qui peuvent nous renseigner sur la qualité sismique d'un bâtiment résidentiel. Le diagnostic de la performance sismique (DSP) permet l'élaboration d'un tableau de bord comprenant les différents objectifs, critères et indicateurs de performance liés à la qualité sismique d'un bâtiment résidentiel (Moussaoui et Cherrared, 2021) comme le tableau suivant la montre :

**Tableau III. 1.** Tableau de bord de diagnostic de performance sismique (DSP)

Objectif	Critère	IP	Symbole	Unité	Référence
Vulnérabilité du sol (VulnSol)	Stabilité du sol (StabSol)	Qualité du sol en surface	QS	/	Ghislaine VERRHIEST (CETE Méditerranée)
		Catégorie du sol (type du site)	CS	/	
		Pente générale du terrain	PT	%	
		Proximité d'un changement de pente	PCP	/	
		Proximité d'eau	PE	%	
		Proximité de soutènement	PS	m	
	Agressivité chimique (AgrChim)	Sulfate	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/l	(Moussaoui et Cherrared, 2015)
		Magnésium	Mg <sup>++</sup>	mg/l	
		Ammonium	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	
	Potential hydrogène	PH	mg/l		
Vulnérabilité de la structure (VulnStr)	Conception architecturale (ConcArch)	Régularité en plan	RP	/	Ghislaine VERRHIEST (CETE Méditerranée)
		Elancement en plan	EP	/	
		Régularité en élévation	REL	/	
		Etages à hauteur différentes (étage transparent)	ET	/	
		Hauteur du bâtiment	HB	m	
		Parties saillantes ou rentrantes	PSR	/	
	Système structurel (SysStr)	Système de contreventement	SC	/	Ghislaine VERRHIEST (CETE Méditerranée)
		Poteaux courts	PC	/	
		Poteaux élancés	PEL	/	
		Alignement des éléments verticaux de contreventement	AC	/	
		Continuité des éléments de contreventement en hauteur	CC	/	
		Forte différence de contreventement (en plan et en élévation)	DC	/	
		Bâtiments accolés avec joint insuffisant ou obstrué	BA	/	
	Etat de la structure (EtatStr)	Age du bâtiment (année de construction)	AB	Année	Ghislaine VERRHIEST (CETE Méditerranée)
		Résistance moyenne à la compression du béton	Fc	MPa	
		Etat général de conservation	EC	/	
		Désordres structuraux constatés	DS	/	
		Risque de chute des éléments non structuraux	CNS	/	

**Tableau III. 2.** Tableau de bord de diagnostic de performance sismique (DSP) – Suite

Objectif	Critère	IP	Symbole	Unité	Référence
Vulnérabilité de la structure (VulnStr)	Etat de la structure (EtatStr)	Projet de réhabilitation et/ou d'entretien pour les anciens bâtiments	PR	/	Ghislaine VERRHIEST (CETE Méditerranée)
Vulnérabilité sociale (VulnSoc)	Age	Ratio de la population âgée > 65 ans	PA	%	(Slovic, 1992)
		Ratio d'enfants < 15 ans	RE	%	(Marris et al. 1995)
	Sexe	Ratio de la population féminine	PF	%	Rohrmann (1995)
		Femmes enceintes	FE	%	Armas 2012
		Femmes avec plus de 5 enfants	FPE	%	Armas, and Avram (2009)
	Qualité de vie (QualVie)	Niveau d'éducation et de sensibilisation	NES	/	(Armas, (2006, 2008a, b))
		Mobilité physique des occupants	MPH	/	(Fertas, 2020)
		Taux d'occupation du logement	TO		Armas 2012
	Secourisme (Secour)	Distance aux hôpitaux	DH	Km	(Dwyer et al., 2004)
		Distance aux postes de protection civil	DPC	Km	
		Distance aux postes de police	DPP	Km	
	Accessibilité (Acces)	Accessibilité au bâtiment (issues de secours, panneaux de signalisations, etc.)	ACB	/	(Dwyer et al., 2004)
Présence de zones libre et dégagé à l'extérieur du bâtiment		ZL	/		
Vulnérabilité environnementale (VulnEnv)	Zonage sismique	ZS	/	(Moussaoui et Cherrared, 2015)	
	Valeurs moyennes d'accélération pour les séismes de magnitude moyenne à fortes	AMoy	/		
	Code de construction utilisé	CCU	/		

### III.3. 2. Méthodes de calcul :

La deuxième étape, après la définition des IPs, est leur calcul. En effet, une méthode de calcul doit être assimilée à chaque IP. Ces méthodes de calcul peuvent être des normes, des relations de calcul analytique et/ou empirique ou semi-empirique, des modélisations par logiciels de calculs, etc.

Le [Tableau III.3](#) jusqu'au [tableau III.8](#) résument les méthodes de calcul des IPs définis dans le [tableau III.1](#).

Tableau III. 3. Méthodes de calcul des IPs des critères « StabSol » et « AgrChim »

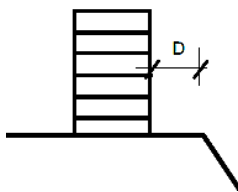
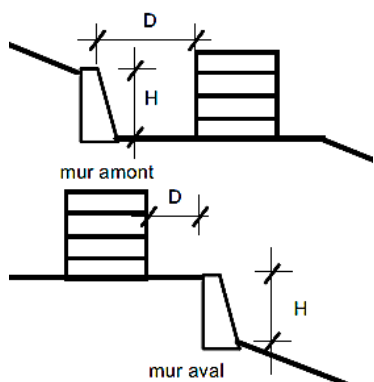
Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
Stabilité du sol	QS	Relevé visuel in situ : Rocher Alluvions Présence de sable Ancien marais	(Battier, 2002)
	CS	Etude mécanique de sol (Rapport de sol) : - Catégorie S1 : sol rocheux, - Catégorie S2 : sol ferme, - Catégorie S3 : sol meuble, - Catégorie S4 : sol très meuble.	(CGS, 2003)
	PT	$Pente (\%) = 100 * \frac{\Delta h}{d}$ - $\Delta h$ : dénivelée, - $d$ : distance horizontale entre les deux extrémités du terrain.	/
	PCP	Distance (D) mesurée comme indiqué sur la figure ci-dessous : 	(Battier, 2002)
	PE	Distance (D) mesuré par rapport à l'eau en surface (bord de mer, rivière, ruisseau, lac, etc.)	(Battier, 2002)
	PS	Distance (D) mesurée comme indiqué sur la figure ci-dessous : 	(Battier, 2002)
Agressivité chimique	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Etude chimique de sol (Rapport de sol) : - XA1 : environnement a faible agressivité chimique, - XA2 : environnement d'agressivité chimique modérée, - XA3 : environnement a forte agressivité chimique.	(NF-EN 206/CN, 2014)
	Mg <sup>++</sup>		
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		
	PH	Mesure de PH (PH-mètre ou kit a PH) : - 5,50 ≤ PH ≤ 6,50 : Faible agressivité, - 4,50 ≤ PH ≤ 6,50 : Agressivité moyenne, - 4,00 ≤ PH ≤ 4,50 : Forte agressivité.	(NF-T 90-008, 2001)

Tableau III. 4. Méthodes de calcul des IPs du critère « ConcArch »

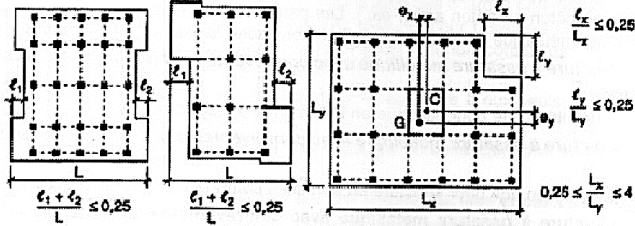
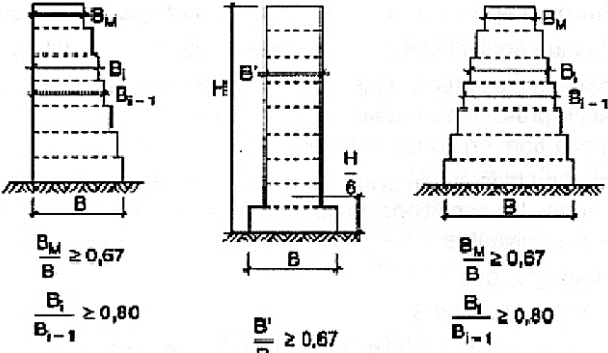
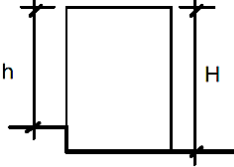
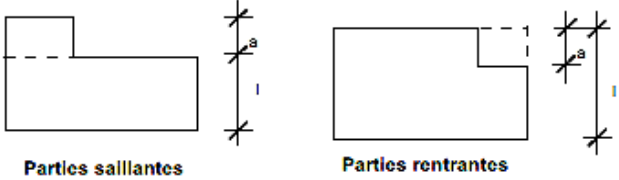
Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
Conception architecturale	RP	<p>Un bâtiment est classé régulier en plan si :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>(I1 + I2) / L \leq 0,25</math></li> <li>- <math>l_x / L_x \leq 0,25</math></li> <li>- <math>l_y / L_y \leq 0,25</math></li> <li>- <math>0,25 \leq L_x / L_y \leq 4</math></li> </ul> 	(Battier, 2002 ; CGS, 2003)
	EP	<p>On dit qu'il y a un élancement en plan si :</p> $\frac{\text{largeur}}{\text{longueur}} > 1/3$	
	REL	<p>Un bâtiment est classé régulier en élévation si :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>B_m / B \geq 0,57</math> et <math>B_i / B_{i-1} \geq 0,80</math></li> <li>- <math>B' / B \geq 0,67</math></li> </ul> 	
	ET	Constat visuel in situ de l'existence d'étages souple.	
	HB	<p>La hauteur (H) du bâtiment (nombre de niveaux) est mesurée à partir de la surface libre du terrain jusqu'au sommet de la structure (y compris l'acrotère).</p> 	
	PSR	<p>Une partie rentrante ou saillante ne doit pas dépassée :</p> $\frac{l_x}{L_x} \leq 0,25 \quad \frac{l_y}{L_y} \leq 0,25 \quad 0,25 \leq \frac{L_x}{L_y} \leq 4$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>l_x, l_y</math> : la somme des dimensions des parties saillante ou rentrante selon la direction x et y,</li> <li>- <math>L_x, L_y</math> : la largeur totale en plan selon la direction x et y.</li> </ul> 	

Tableau III. 5. Méthodes de calcul des IPs du critère « SysStr »

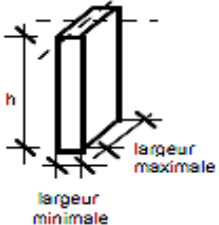
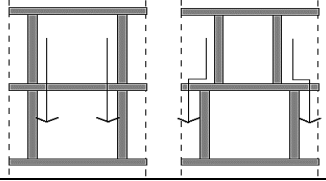
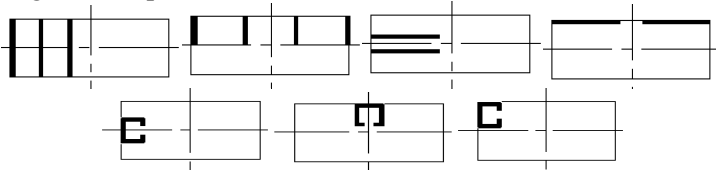
Critère	IP	Méthode de calcul	Référence										
Système structurel	SC	<p>La nature du système de contreventement est définie par la réglementation algérienne en vigueur. Pour les bâtiments à usage d'habitation (bâtiment en béton armé), le contreventement est soit un système en portique (poteau+poutre), soit un système mixte (voile+portique) ou une construction en voile.</p> <p>Les restrictions données par la réglementation pour le choix du mode de contreventement sont en fonction de la zone sismique ainsi que de la hauteur du bâtiment :</p> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td rowspan="2">Zone I</td> <td colspan="2">Zone II</td> <td rowspan="2">Zone III</td> </tr> <tr> <td>Zone IIa</td> <td>Zone IIb</td> </tr> <tr> <td>H ≤ 17m</td> <td>H ≤ 14m</td> <td>H ≤ 11m</td> <td>H ≤ 8m</td> </tr> </table>	Zone I	Zone II		Zone III	Zone IIa	Zone IIb	H ≤ 17m	H ≤ 14m	H ≤ 11m	H ≤ 8m	(CGS, 2003)
	Zone I	Zone II		Zone III									
		Zone IIa	Zone IIb										
	H ≤ 17m	H ≤ 14m	H ≤ 11m	H ≤ 8m									
	PC	Un poteau est dit court si : la hauteur libre $h < 4 \times$ largeur maximale. (Risque de rupture par cisaillement)		(Battier, 2002)									
	PEL	Un poteau est dit élancé si : la hauteur libre $h > 20 \times$ largeur minimale. (Risque de rupture par flambement)											
	AC	<p>La distribution verticale des éléments de contreventement doit être régulière et de préférence superposées afin de conférer aux différents niveaux une rigidité comparable aussi bien en translation qu'en torsion. Ceci dit, Une mauvaise disposition des palées de stabilité pourra entraîner des effondrements dus à des déformations trop importantes.</p> 	(A. Kassoul, 2016)										
CC	Le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu, dont la charge ne se transmette pas directement à la fondation.	/											
DC	<p>La forte différence de contreventement (en plan et en élévation) crée des distorsions dues aux moments. Cet IP peut être évalué directement dans le cas où la différence est flagrante ou par modélisation.</p> 	(Battier, 2002)											
BA	<p>Les joints sismiques doivent assurer l'indépendance complète des blocs qu'ils délimitent et empêcher leur entrechoquement, ils doivent être plans, sans décrochement et débarrassés de tout matériau de corps étranger.</p> <p>La largeur minimale d'un joint sismique séparant deux blocs est : <math>d_{min} = 15(mm) + (\delta_1 + \delta_2) \geq 40(mm)</math></p> <p><math>\delta_1, \delta_2</math>: déplacement max des deux blocs au sommet.</p>	(CGS, 2003)											

Tableau III. 6. Méthodes de calcul des IPs du critère « EtatStr »

Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
Etat de la structure	AB	L'âge du bâtiment est calculé à partir de la fin de sa construction (écrasement d'éprouvettes et de carottes).	/
	Fc	Essai in situ (scléromètre, ultra-son, radar, etc.) et au laboratoire.	/
	EC	L'état de conservation du bâtiment est évalué selon l'échelle suivante : <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 = Bâtiment bien entretenu ou restauré selon les règles de l'art,</li> <li>- 2 = Bâtiment partiellement entretenu ou dont la restauration est aisée,</li> <li>- 3 = Bâtiment menaçant ruine ou déprécié par une rénovation ou une transformation,</li> <li>- 4 = Bâtiment en état de ruine.</li> </ul>	Conservation du patrimoine architectural alpestre – A
	DS	Constats visuels lors de visites in-situ.	/
	CNS		
PR			

Tableau III. 7. Méthodes de calcul des IPs de l'objectif « VulnSoc »

Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
Age	PA	$= \frac{\text{NbrePA}}{\text{Populationtotale}}$	(Armaş, 2012)
	RE	$= \frac{\text{Nbre RE}}{\text{Populationtotale}}$	
Sexe	PF	$= \frac{\text{NbrePf}}{\text{Populationtotale}}$	
	FE	$= \frac{\text{Nbrefe}}{\text{Populationfemmelletotale}}$	
	FPE	$= \frac{\text{Nbre fpe}}{\text{Populationfemmelletotale}}$	
Qualité de vie	NES	$= \frac{\sum_1^n \text{Notedechaquepersonne}}{\sum_1^n \text{Nombretotaldesrepenses}}$	(Moussaoui, 2018)
	MPH	$= \frac{\text{Nbredepersonnemalades}}{\sum_1^n \text{Totalitédesindividus}}$	(Fertas, 2020)
	TO	$P\% = \frac{\sum_1^n \text{Personnesoccupées}}{\sum_1^n \text{Totalitédespersonnes}}$ $\text{Moyenne } P\% = \frac{\sum_{i=1}^n P\%}{4}$	(Armaş, 2012)
Secourisme	DH	Mesure de la distance sur GoogleMaps	/
	DPC		
	DPP		
Accessibilité	ACB	/	(Armaş, 2012)
	ZL		

**Tableau III. 8.** Méthodes de calcul des IPs de l'objectif « VulnEnv »

Objectif	IP	Méthode de calcul	Référence
Vulnérabilité économique	ZS	Le zonage sismique est déterminé à partir de la réglementation parasismique algérienne	(CGS, 2003)
	Amoy	Calcul à partir des données statistiques disponible sur le site du CRAAG dans la zone d'étude	/
	CCU	Nouveau code (RPA 99 v.2003) ou ancien code (RPA 99, 88, 83 et 81 et AS 55)	/

### III.3. 3. Echelle de performance

Pour évaluer la performance des objectifs retenus, nous devons tout d'abord convertir les valeurs des indicateurs en valeurs de performance en utilisant une échelle de performance.

Nous avons choisi une échelle de zéro à un (0 à 1). La valeur un (1) correspond à la meilleure performance ( $P = 1$ ) et zéro (0) à la pire ( $P = 0$ ). Afin de transformer la mesure initiale des indicateurs en scores, entre 0 et 1, des fonctions de performance doivent d'abord être construites en utilisant des bases scientifiques existantes (normes, etc.) et, lorsque celles-ci ne sont pas disponibles, des recommandations des experts du bâtiment. (Moussaoui, 2018)

#### III.3.3. 1. Echelle de performance pour le critère stabilité du sol (Stabsol)

**A. indicateur :** qualité de surface en sol (QS) :

L'évaluation de cet indicateur est qualitative selon le tableau suivant :

**Tableau III. 9.** Echelle de performance de l'indicateur QS.

Indicateur	Rocher	Alluvions	Présence de sable	Ancien marais
Performance	0.9	0.7	0.5	0.1

**B. indicateur :** Catégorie du sol (CS) :

L'évaluation de cet indicateur est qualitative selon le tableau suivant :

**Tableau III. 10.** Echelle de performance de l'indicateur CS.

Indicateur	Sol rocheux	Sol ferme	Sol meuble	Sol très meuble
Performance	0.9	0.7	0.5	0.1

**C. indicateur :** Pente générale du terrain (PT) :

On propose la méthode indiquée sur le tableau pour évaluer la performance de cet indicateur :

**Tableau III. 11.** Echelle de performance de l'indicateur PT

Indicateur	Nulle	Très faible	Faible	Modérée	Forte	Très forte
	0	P<10%	10%<P<20%	20%<P<30%	30%<P<40%	>40%
Performance	1	0.9	0.7	0.5	0.2	0.1

**D. indicateur :** Proximité d'un changement de pente (PCP) :

**Tableau III. 12.** Echelle de performance de l'indicateur PCP.

Indicateur	Faille proche à la construction	
Distance	D> 2H	D< 2H
Performance	Bonne	Mauvaise
	0.9	0.1

**E. indicateur :** Proximité d'eau (PE) :

**Tableau III. 13.** Echelle de performance de l'indicateur PE.

Indicateur	PE	
Distance	D> 100m	D< 100m
Performance	Bonne	Mauvaise
	0.9	0.1

**F. indicateur :** Proximité de soutènement (PS) :

**Tableau III. 14.** Echelle de performance de l'indicateur PS.

Indicateur	PS	
Distance	D> 2H	D< 2H
Performance	Bonne	Mauvaise
	0.9	0.1

**III.3.3. 2. Echelle de performance pour le critère agressivité chimique (AgrChim) :**

**Tableau III. 15.** Echelle de performance des IPs du critère AgrChim.

Degrés d'agressivité	Nulle	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Agents agressifs	Concentration en (mg/l)				
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	<250	250 à 600	600 à 1500	1500 à 6000	>6000
Mg <sup>++</sup>	<100	100 à 300	300 à 1500	1500 à 3000	>3000
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<15	15 à 30	30 à 60	60 à 100	>100
Ph	>6.5	6.5 à 5.5	5.5 à 4.5	4.5 à 4	<4
Performance	Excellente	Bonne	Moyenne	Médiocre	Mauvaise

**III.3.3. 3. Echelle de performance pour le critère Conception architecturale (ConcArch)**

**A. indicateur :** régularité en plan (RP) :

**Tableau III. 16.** Echelle de performance de l'indicateur RP.

Régularité en plan	Bâtiment régulier	Bâtiment non régulier
Performance	1	0.1

**B. indicateur :** élancement en plan (EP) :

**Tableau III. 17.** Echelle de performance de l'indicateur EP.

Elancement en plan	Bâtiment élancé	Bâtiment non élancé
Performance	0.1	1

**C. indicateur :** régularité en élévation (REL) :

**Tableau III. 18.** Echelle de performance de l'indicateur REL.

Régularité en élévation	Bâtiment régulier	Bâtiment non régulier
Performance	1	0.1

**D. indicateur :** Etages à hauteur différentes (ET) :

**Tableau III. 19.** Echelle de performance de l'indicateur ET.

Indicateur	Présence d'un étage transparent	Absence de l'étage transparent
Performance	0.1	1

**E. indicateur :** Hauteur du bâtiment (HB) :

L'évaluation de cet indicateur est qualitative selon le tableau et la figure suivante :

**Tableau III. 20.** Echelle de performance de l'indicateur HB.

Hauteur (m)	0-Lim	Lim-20	20-33	>33m
Performance	0.9	0.7	0.5	0.1
*	Zone I		Zone II	Zone III
	Lim=17m		Lim=14m	Lim=11m

**F. indicateur :** Parties saillantes ou rentrantes (PSR) :

**Tableau III. 21.** Echelle de performance de l'indicateur PSR.

Indicateur	$\frac{l_x}{L_x} \leq 0.25 ; \frac{l_y}{L_y} \leq 0.25 ; 0.25 \leq \frac{l_x}{L_x} \leq 4$	Sinon
Performance	Bonne	Mauvaise
	0.9	0.1

**III.3.3. 4. Echelle de performance pour le critère Système structurel (SysStr)**

**A. indicateur :** Système de contreventement (SC) :

La stabilité globale d'un bâtiment se base sur le système de contreventement, il peut être réalisé pour une construction en béton armé par un portique auto stable ou pour une construction mixte avec des conditions spécifiques selon la zone sismique.

L'évaluation de l'indicateur SC est qualitative comme présente le tableau suivant :

**Tableau III. 22.** Echelle de performance de l'indicateur SC (portique auto stable).

Zone	I		II				III	
			II-a		II-b			
Condition	$N_{\text{étage}} \leq 5$ $H \leq 17m$	Sinon	$N_{\text{étage}} \leq 4$ $H \leq 14m$	Sinon	$N_{\text{étage}} \leq 3$ $H \leq 11m$	Sinon	$N_{\text{étage}} \leq 2$ $H \leq 8m$	Sinon
Performance	Bonne	Mauvaise	Bonne	Mauvaise	Bonne	Mauvaise	Bonne	Mauvaise

**Tableau III. 23.** Echelle de performance de l'indicateur SC (construction mixte).

Zone	I, IIa, IIb, III	
Condition	$N_{\text{étage}} \leq 10$ $H \leq 33m$	Sinon
Performance	Bonne	Mauvaise

**B. indicateur :** poteau court/élané (PC/PEL) :

**Tableau III. 24.** Echelle de performance des deux indicateurs PC/PEL.

Indicateur	Présence du poteau court/élané	Absence du poteau court/élané
Performance	0.1	1

**D. indicateur :** Alignement des éléments verticaux de contreventement (AC) :

Pour cet indicateur, nous adoptons l'évaluation binaire représentée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III. 25.** Echelle de performance de l'indicateur AC.

Indicateur	Superposé et verticalement régulier	Sinon
Performance	Bonne	Mauvaise
	0.9	0.1

**E. indicateur :** Continuité des éléments de contreventement en hauteur (CC) :

**Tableau III. 26.** Echelle de performance de l'indicateur CC.

Indicateur	Continuité des éléments et le transmet des charges	Sinon
Performance	Bonne	Mauvaise
	0.9	0.1

**F. indicateur :** Forte différence de contreventement (en plan et en élévation) :

**Tableau III. 27.** Echelle de performance de l'indicateur DC

Indicateur	Existence de forte différence	Sinon
Performance	Mauvaise	Bonne
	0.9	0.1

**G. indicateur :** Bâtiments accolés avec joint insuffisant ou obstrué (BA) :

En construction, les joints désignent les coupures réalisées entre deux bâtiments. Elles permettent d'absorber les mouvements éventuels de l'ouvrage. En outre l'épaisseur du joint joue un grand rôle pour avoir une bonne performance qui est présenté dans le tableau ci-dessous :

**Tableau III. 28.** Echelle de performance de l'indicateur BA.

Épaisseur	$d < 4\text{cm}$	$d > 4\text{cm}$
Performance	Mauvaise	Bonne

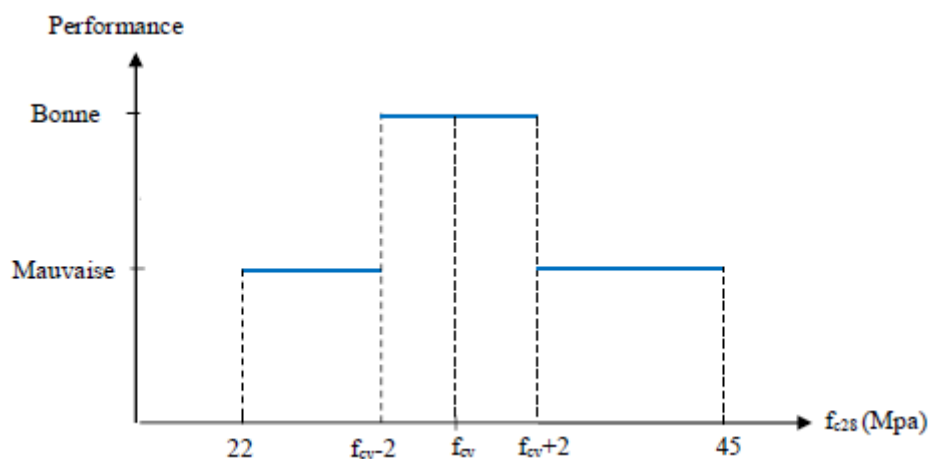
### III.3.3. 5. Echelle de performance pour le critère Etat de la structure (EtatStr)

**A. indicateur :** Age du bâtiment (AB) :

**Tableau III. 29.** Echelle de performance de l'indicateur AB.

Age du bâtiment	<10ans	10-30ans	30-50ans	>50ans
Performance	1	0.85	0.75	0.1

**B. indicateur :** Résistance moyenne à la compression du béton ( $F_c$ ) :



**Figure III. 2.** Echelle de performance de l'indicateur  $F_c$ .

Pour les éléments principaux, le béton doit avoir une résistance  $f_{c28}$  au moins égale à 25 MPa et au plus égale à 45 MPa.

- $F_{c_v}$  : résistance voulue (demandé dans le cahier de charges)
- $F_{c_v} \pm 2$  : tolérance de 2Mpa

L'évaluation de cet indicateur est qualitative c.à.d.

- Bonne si :  $F_{c_v} \in [f_{c_v} - 2 ; f_{c_v} + 2]$
- Mauvaise si :  $F_{c_v} \notin [f_{c_v} - 2 ; f_{c_v} + 2]$

Si  $f_{c28} < f_{c_v} - 2 \Rightarrow$  non résistant  $\Rightarrow$  non acceptable.

Si  $f_{c28} > f_{c_v} + 2 \Rightarrow$  très résistant  $\Rightarrow$  sur coût inutile  $\Rightarrow$  non acceptable

**C. indicateur** : Etat général de conservation (EC) :

L'évaluation de cet indicateur est qualitative selon le tableau suivant :

**Tableau III. 30.** Echelle de performance de l'indicateur EC.

Indicateur	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais
Performance	0.9	0.7	0.5	0.1

**D. indicateur** : Désordres structuraux constatés (DS) :

Pour cet indicateur, nous adoptons l'évaluation binaire représentée dans le [tableau III.31](#) :

**Tableau III. 31.** Echelle de performance de l'indicateur DS.

Indicateur	Oui	Non
Performance	0.1	1

**E. indicateur** : Risque de chute des éléments non structuraux (CNS) :

**Tableau III. 32.** Echelle de performance de l'indicateur CNS.

Indicateur	Oui	Non
Performance	0.1	1

**F. indicateur** : Projet de réhabilitation et/ou d'entretien pour les anciens bâtiments (PR) :

**Tableau III. 33.** Echelle de performance de l'indicateur PR.

Indicateur	Oui	Non
Performance	1	0.1

### III.3.3. 6. Echelle de performance pour le critère Age et sexe

Tableau III. 34. Echelle de performance les indicateurs âge et sexe.

Indicateur	100%	]100-75] %	]75-50] %	]50-25] %	]25-00[ %	00%
Performance	0	0.1	0.4	0.7	0.9	1

### III.3.3. 7. Echelle de performance pour le critère Qualité de vie (QualVie)

#### A. Indicateur : Niveau d'éducation et sensibilisation (*Nes*) :

Cet indicateur mesure le niveau de connaissance de la population résidente vis-à-vis des bonnes pratiques à faire lors d'un tremblement de terre. Pour cela, nous avons développé un questionnaire contenant cinq questions qui seront posées à la population résidente du bâtiment d'habitation.

**Question 1 :** que devriez-vous faire avant un séisme ? (4 points)

- Ne pas prendre le risque sismique en importance.
- Fixer bien les éléments qui peuvent tomber et engendrer des dégâts.
- Déterminer les endroits sécuritaires dans le ménage.
- Ne pas avoir une boîte à pharmacie.

**Question 2 :** Que faites-vous lors d'une secousse de terre ? (6 points)

- Sauter de la fenêtre.
- Fuir directement vers l'extérieur.
- Attendre la secousse passe.
- S'agripper sous un élément structural rigide.

**Question3 :** Apres la première secousse qu'allez-vous faire ? (4 points)

- Allumer la télévision et voir les informations.
- Allez chez les voisins et se rendre visite et les aider.
- Se dégager vers l'extérieur, et attend les autres en dessous de bâtiment.
- Se dégager aux endroits libres et attendre que les répliques passent.

**Question 4 :** que devriez-vous faire après les secousses ? (4 points)

- Rester et attendre.
- Retourner à la maison.
- Appeler et signaler les urgences.

**Question 5 :** qui sont les actions à suivre ? (2 points)

- Fuir et utiliser l'ascenseur.
- Utiliser les panneaux d'aide à sortir.
- Se prendre les couloirs sans savoir où se mènent.
- Se calmer et maîtriser les choses à faire.

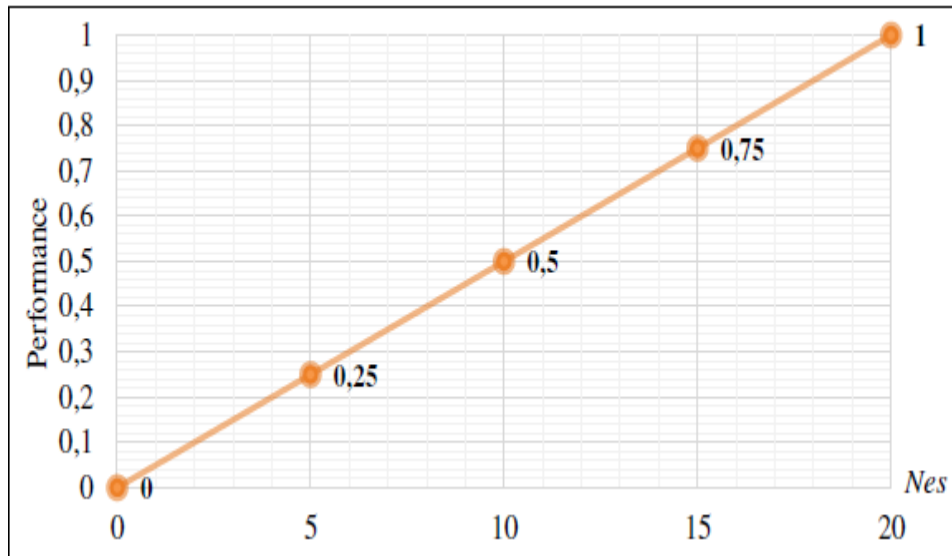


Figure III. 3. Echelle de performance de l'indicateur Nes.

**B. Indicateur :** Mobilité physique des occupants (MPH) :

Tableau III. 35. Echelle de performance de l'indicateur MPH.

Indicateur	[100-75] % malades	]75-50] % malades	]50-25] % malades	]25-0[% malades	0% malades
Performance	0	0.1	0.4	0.7	1

**D. Indicateur :** Taux d'occupation du logement (TO) :

$$\begin{cases} F_2 \approx 35 \pm 5m^2 \rightarrow 3 \text{ personnes} \\ F_3 \approx 45 \pm 5m^2 \rightarrow 5 \text{ personnes} \\ F_4 \approx 65 \pm 5m^2 \rightarrow 7 \text{ personnes} \\ F_5 \approx 75 \pm 5m^2 \rightarrow 9 \text{ personnes} \end{cases}$$

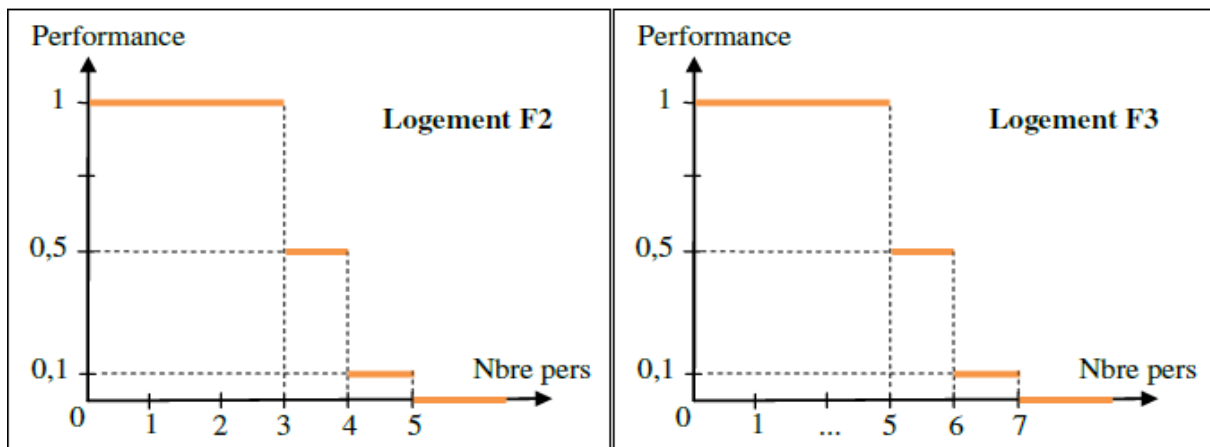


Figure III. 4. Echelle de performance de l'indicateur TO (logements F2 et F3).

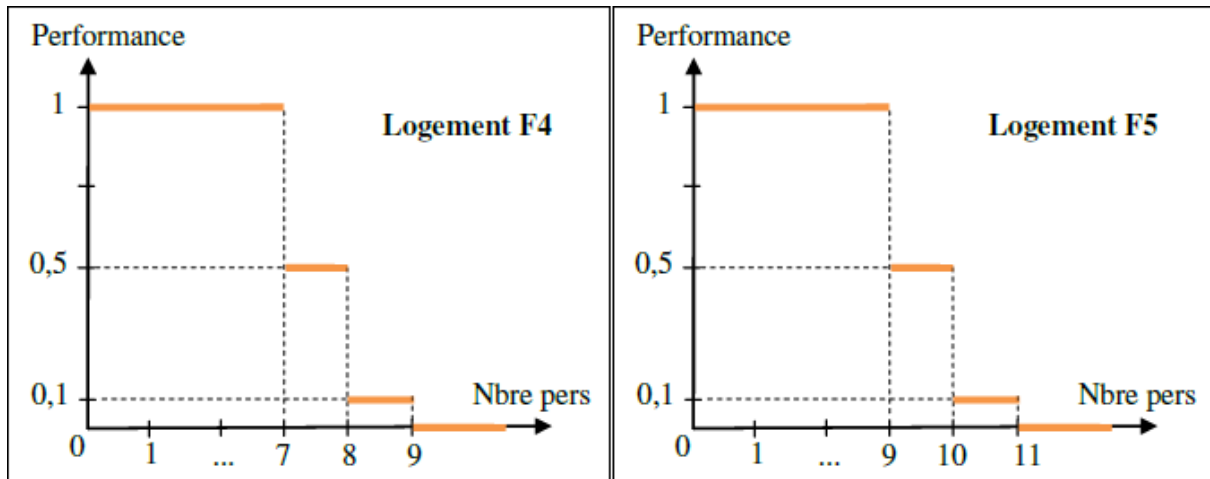


Figure III. 5. Echelle de performance de l'indicateur TO (logements F4 et F5).

III.3.3. 8. Echelle de performance pour le critère Secourisme (Secour)

Tableau III. 36. Echelle de performance des indicateurs DH/DPC/DPP.

Distance	0-15km	15-30km	30-45km	>45km
Performance	0.9	0.7	0.4	0.1

III.3.3. 9. Echelle de performance pour le critère Accessibilité (Acces)

A. Indicateur : Accessibilité au bâtiment (ACB) :

Tableau III. 37. Echelle de performance de l'indicateur ACB.

Accessibilité	Très facile	Facile	Moyenne	Difficile
Performance	1	0.7	0.4	0

B. Indicateur : présence de zones libre de dégager (ZL) :

Tableau III. 38. Echelle de performance de l'indicateur ZL.

Zone	Largement suffisante	Moyennement suffisante	Pas d'espace
Performance	1	0.5	0

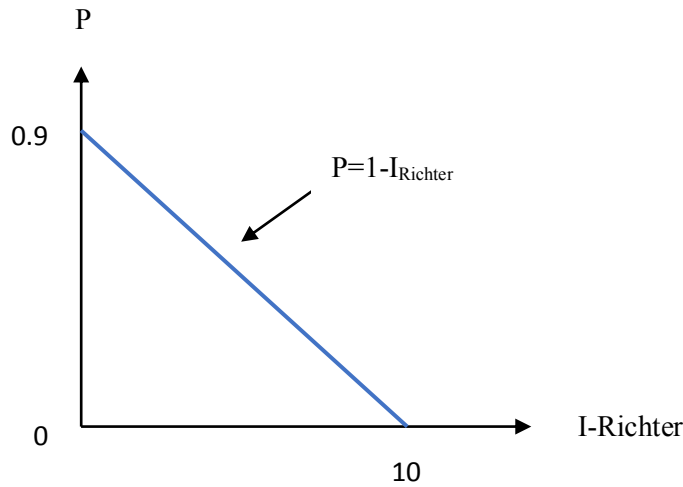
III.3.3. 10. Echelle de performance pour la Vulnérabilité environnementale (VulnEnv)

A. Indicateur : Zonage sismique (ZS) :

Tableau III. 39. Echelle de performance de l'indicateur ZS.

Zones	Zone 0	Zone I	Zone II		Zone III
			Zone II-a	Zone II-b	
Sismicité	Nulle	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Performance	1	0.8	0.6	0.4	0.1

**B. Indicateur :** Valeurs moyennes d'accélération pour les séismes de magnitude moyenne à fortes :



**Figure III. 6.** Echelle de performance de l'indicateur Amoy.

**C. Indicateur :** Code de construction utilisé (CCU) :

**Tableau III. 40.** Echelle de performance de l'indicateur CCU.

Règlement	RPA 99 v 2003	RPA99	RPA 88	RPA83, 81 et AS55
Performance	1	0.7	0.4	0.1

### III. 4. Approche diagnostic ascendante - "Buttom-up"

Les méthodes d'agrégation les plus fréquemment utilisées sont : l'agrégation complète, partielle et locale (Ben Mena, 2000; Benzzerza et al., 2012; Roy & Bouyssou, 1993) :

- L'agrégation complète : elle suggère d'inclure toutes les performances dans une fonction d'agrégation, en leur attribuant d'éventuels poids
- L'agrégation partielle : la technique consiste à comparer les performances deux à deux et à vérifier, selon certaines conditions pré-établies, si l'une des deux actions surclasse l'autre ou pas et ce, de façon claire et nette
- L'agrégation locale : elle considère que la performance peut être très grande, voire infinie. La technique consiste alors à considérer une performance de départ, aussi bonne que possible, et à chercher autour de cette performance s'il n'y en a pas de meilleure.

L'agrégation des indicateurs nécessite une grande clarté et une simplicité de réalisation, c'est pourquoi nous avons opté pour une agrégation complète. C'est-à-dire, l'inclusion de l'ensemble des performances des indicateurs dans une formule mathématique en vue de l'obtention d'une valeur unique de performance pour chaque critère (Cherrared et al., 2011).

L'agrégation complète est aussi la méthode la plus appropriée pour agréger tous les indicateurs correspondant à un critère commun.

Il existe une grande variété de méthodes d'agrégation complète, telles que :

- La comparaison par paire (Limayem & Yannou, 2004)
- La méthode des additions linéaires ; Somme pondérée (Roy & Bouyssou, 1993)
- La théorie de l'unité multi-attributs (Bryhn, Jiménez, Mateos, & Ríos-Insua, 2009)
- Ou autres fonctions mathématiques telles que celle développée par (Nassar, Thabet, & Beliveau, 2003)
- Etc.

Malgré le débat intense dans la communauté internationale sur la meilleure méthode, le choix de la méthode n'est pas un problème pour les utilisateurs des méthodes multicritères de décision. En effet, une analyse multicritère de décision attribue un poids à chaque critère pour obtenir ensuite une somme pondérée (Poveda & Lipsett, 2011a). L'un des enjeux critiques de l'élaboration d'un système d'évaluation de la durabilité est la répartition des poids et des pondérations entre les différents domaines et critères du système de notation (Trusty, 2008).

#### III.4. 1. Description du processus d'agrégation adopté

L'approche ascendante implique le développement de méthodes d'agrégation qui permettent de déterminer un score global pour l'ensemble de la performance du bâtiment à partir des valeurs obtenues des IPs. Dans notre cas, cette approche est basée sur une agrégation multicritère et évalue les performances en utilisant la méthode de la somme pondérée (MSP), les poids des IPs sélectionnés ont été calculés en utilisant la méthode AHP.

#### III.4. 2. La méthode de la somme pondérée (MSP)

Parmi les techniques susmentionnées, c'est la méthode la plus utilisée (Ben Mena, 2000; Pohekar & Ramachandran, 2004). Janssen (2001) affirme que : "la somme pondérée est la méthode d'agrégation la plus utilisée dans les études de décision". La méthode de la somme pondérée est utilisée pour sa clarté et sa simplicité. En effet, cette approche est relativement simple : la note globale est calculée comme la pondération moyenne des scores standardisés (Janssen, 2001).

La MSP consiste à attribuer une note de performance à chaque indicateur  $IP_{ji}$ , qui sera multipliée par un coefficient de pondération  $w_i$ . La somme sur  $n$  indicateurs donne un résultat de performance agrégé et exprimé dans une note globale (Formule suivante) :

$$PC_j = \sum_{i=1}^n PI_{ji} \times W_i$$

Avec :

- $PC_j$  : valeur de performance pour le critère  $C_j$  ;
- $PI_{ji}$  : valeur de performance pour l'indicateur  $I_i$  du critère  $C_j$  ;
- $w_i$  : valeur du coefficient de pondération pour l'indicateur  $I_i$  du critère  $C_j$ .

Afin d'attribuer les coefficients de pondération ( $w_i$ ), nous utiliserons la méthode AHP (Analytic Hierarchic Process). La méthode AHP est la plus utilisée pour les problèmes de décision entre 2000 et 2014. Ainsi, nous proposons donc de calculer les poids des critères par la méthode AHP puis d'agréger les critères grâce à une somme pondérée.

### III.4. 3. La méthode AHP standard

Saaty (1977) a proposé, il y a juste 40 ans, le modèle AHP, qui est une méthode assez simple dans son principe et dans sa mise en œuvre, ce qui explique, peut-être, le nombre assez important de publications scientifiques qu'elle a déclenché. La résolution de problèmes selon la méthode AHP est l'analyse multicritère la plus répondeuse parce qu'elle accompagne le décideur dans la méthodologie de formulation de son problème et en particulier parce qu'elle propose une méthode d'évaluation des paramètres d'importance. Les raisons de sa popularité (les points forts de la méthode) sont :

- Unités de mesures : qualitatives et quantitatives
- Structure hiérarchique : trie des éléments d'un système dans différents niveaux
- Interdépendance : permet de considérer l'interdépendance des éléments d'un système
- Consistance : permet de garder une consistance logique des jugements utilisés pour déterminer les priorités
- Synthèse : permet d'obtenir une appréciation générale de la désirabilité de chaque alternative
- Identification des priorités : permet de considérer la priorité relative de chaque critère pour ainsi obtenir la meilleure alternative selon les objectifs identifiés
- Unicité : sa flexibilité permet son utilisation dans un éventail varié de problèmes non structurés.

Nous présentons cette méthode en quatre étapes :

- Hiérarchisation des critères par importance du plus important au moins important
- Construction d'une matrice à partir de la comparaison deux à deux des critères
- Détermination des poids associés à chaque critère grâce à une méthode approchée de calcul des vecteurs propres
- Enfin vérification de la consistance du résultat.

#### III.4.3. 1. Hiérarchisation des critères par importance

Le point de départ de la méthode est de décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique en définissant une arborescence hiérarchique de critères et de sous critères. Chaque critère doit être identifié avec sa définition et son intensité.

Soit  $C_1 \dots C_i \dots C_n$  l'ensemble des critères dont on recherche le coefficient de pondération.

La hiérarchisation doit aboutir à un classement dans lequel  $C_1$  est plus important que  $C_{i-1}$  qui est plus important que  $C_i$  et ainsi de suite jusqu'à  $C_n$  qui sera le critère de moindre importance. La relation d'importance définie ici n'est pas stricte, cela signifie que  $C_{i-1}$  est aussi important ou plus important que  $C_i$ .

#### III.4.3. 2. Comparaison deux à deux des critères

Soit  $w_i$  le poids du critère  $C_i$ . La détermination des poids des facteurs se fait une fois que la hiérarchie complète du problème est posée. On compare deux à deux les différentes branches de même niveau, en attribuant une note chiffrée (Tableau III.41) à la façon dont on ressent la différence entre les deux critères. Ainsi on dispose de toute cette échelle de valeurs pour remplir

une matrice de jugements (ou matrice de décision) qu'on notera "A" dans la formulation mathématique.

**Tableau III. 41.** Echelle d'importance entre indicateurs

Intensité de l'importance	Définition	Explication
1	Importance égale	Les deux indicateurs contribuent identiquement à l'objectif
3	Faible importance de l'un sur l'autre	L'expérience et le jugement favorisent légèrement un indicateur sur l'autre
5	Importance essentielle ou forte	L'expérience et le jugement favorisent fortement un indicateur sur l'autre
7	Importance démontrée	Un indicateur est fortement favorisé et sa prépondérance est démontrée
9	Importance absolue	Il est évident qu'un indicateur doit être favorisé au maximum
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugements adjacents quand un compromis est nécessaire	
Valeurs inverses	Utilisées pour montrer la dominance du second élément par rapport au premier	

Par exemple, si le critère Ci a une importance essentielle par rapport au critère Cj, alors le rapport wi/wj sera égal à 5. En comparant entre eux chacun des critères, on obtient la matrice suivante :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1i} & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ii} & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ a_{j1} & \dots & a_{ij} & a_{jj} & \dots & a_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{ni} & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{Avec } a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \text{ et } a_{ii} = 1$$

Où : aij est l'intensité de l'importance de Ci sur Cj et wi le coefficient de pondération associé à Ci.

### III.4.3. 3. Détermination des poids associés à chaque critère

Ensuite, on recherche le vecteur des coefficients de pondération  $W = (w_1 \dots w_i \dots w_n)$ . Id la matrice identité d'ordre  $n$ ,  $n$  étant le nombre d'actions prises en compte dans l'étude (ou la taille de la matrice de décision  $A$ ). Ensuite, une fois cette matrice remplie, on normalise par colonne cette matrice (on additionne les valeurs d'une même colonne, puis on divise chaque nombre de la colonne par cette somme). Puis on calcule la moyenne arithmétique des nombres sur chaque ligne. Chaque ligne correspondant à un critère, la moyenne associée au critère définit le poids avec la formule suivante :

$$W = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{1i}}{\sum_{k=1}^n a_{ki}} + \dots + \frac{a_{1n}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}} \\ \dots \\ \frac{a_{i1}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{ii}}{\sum_{k=1}^n a_{ki}} + \dots + \frac{a_{in}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}} \\ \dots \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{ni}}{\sum_{k=1}^n a_{ki}} + \dots + \frac{a_{nn}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{1l}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \\ \dots \\ \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \\ \dots \\ \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{nl}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \end{bmatrix}$$

En résumé, chaque coefficient  $w_i$  est obtenu par la formule :

$$w_i = \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n}$$

### III.4.3. 4. Vérification de la consistance des résultats

Un grand avantage de la méthode est qu'elle calcule un indice dit "Ratio de consistance" ou bien "Ratio de cohérence", qui permet d'évaluer les calculs effectués. En d'autres termes, il permet de vérifier si les valeurs de l'échelle (1 – 9) attribuées par le décideur sont cohérentes ou non

Pour une matrice donnée, on retient sa valeur propre maximale  $\lambda_{max}$  :

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n}$$

Avec :

$$\lambda_i = \frac{\lambda'_i}{w_i}$$

Et :

$$\begin{bmatrix} \lambda'_1 \\ \dots \\ \lambda'_i \\ \dots \\ \lambda'_n \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n w_k \times \begin{bmatrix} a_{1k} \\ \dots \\ a_{ik} \\ \dots \\ a_{nk} \end{bmatrix} = w_1 \times \begin{bmatrix} a_{11} \\ \dots \\ a_{1i} \\ \dots \\ a_{1n} \end{bmatrix} + \dots + w_i \times \begin{bmatrix} a_{1i} \\ \dots \\ a_{ii} \\ \dots \\ a_{ni} \end{bmatrix} + \dots + w_n \times \begin{bmatrix} a_{1n} \\ \dots \\ a_{in} \\ \dots \\ a_{nn} \end{bmatrix}$$

L'indice de consistance  $CI$  d'une matrice ( $n \times n$ ) est donné par la formule :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Le ratio de consistance ( $CR$ ) est ensuite calculé en utilisant la formule suivante, où  $RI$  est un indice de consistance obtenu par un grand nombre de simulations (Tableau III.42).

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Tableau III. 42. Valeurs du coefficient RI

Taille de la matrice (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53	1.56	1.57	1.59

Le ratio de cohérence peut être interprété comme la probabilité que la matrice soit complétée aléatoirement. La cohérence globale d'appréciation est évaluée au moyen de ce ratio de consistance CR. Toujours selon Saaty, la valeur de ce dernier doit être au plus égale à 10%. Dans le cas où cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions.

### III. 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu dessiner les étapes de la méthodologie choisies pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique (le thème de notre travail), et cela en deux parties :

- Dans la première partie, encadrée par l'approche descendante TOP-DOWN, on définit les indicateurs nécessaires à évaluer intitulés chacun à son critère pour former des différents objectifs qui définissent la vulnérabilité totale de la construction.
- Ensuite, on a adopté la méthode AHP qui a été présentée, comprise et évaluée comme une méthode d'agrégation des IPs, on a tracé la pyramide des calculs et les différentes étapes à suivre nécessaire pour l'application ce qu'on va voir dans le chapitre suivant.

# Application de la méthodologie proposée sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans la ville de Bouira

*Dans cette dernière partie du travail, nous confronterons la méthodologie développée et la base de données récoltée sur deux cas réels de bâtiment d'habitation dans la région de Bouira. Les résultats obtenus seront présentés puis discutés et argumentés*

## IV.1. Introduction

A l'issue du travail mené jusqu'à maintenant, nous confrontons dans ce chapitre la méthodologie développée à deux cas réels de bâtiment d'habitation que nous avons choisi le premier dans la commune de Ain Bassam et le deuxième dans la commune de Bouira et ce, en fonction des données statistiques disponibles. Nous commencerons dans un premier lieu par une présentation du cas d'étude. Ensuite, et à l'aide des méthodes de calcul et des échelles de performance développées dans le troisième chapitre, nous calculerons puis évaluerons les performances de chaque IPs. Nous allons enchaîner avec la pondération des différents paramètres de l'évaluation de la vulnérabilité (objectifs, critères et IPs) en utilisant la méthode AHP. Enfin, nous terminerons par une agrégation des performances dans le but d'évaluer la vulnérabilité de notre cas d'étude. Les résultats obtenus seront aussi présentés puis discutés et argumentés dans ce chapitre

## IV.2. Présentation des cas d'étude

### ➤ 1<sup>er</sup> cas d'étude :

Nous avons choisi un bâtiment à usage d'habitation de l'O.P.G.I. En fonction des données disponibles, nous avons choisi un bâtiment (bloc A) appartenant à un projet de 50 / 150 logements LSP devisé en 3 blocs construits en 2016. Nous présentons les caractéristiques du bâtiment dans le **Tableau IV.1**

**Tableau IV. 1.** Présentation du bâtiment (bloc A).

Bâtiment (bloc A)	
Présentation	RDC+ 5 étages contreventé par un système mixte (portique + voiles)
Implantation	Ain Bassam (wilaya de bouira), zone de moyenne sismicité IIa
Caractéristiques structurales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ossature : l'ouvrage est de 6 niveaux → contreventement mixte</li> <li>- Plancher : 16+4 (cm)</li> <li>- Les escaliers : un seul type</li> <li>- Maçonnerie : murs extérieurs en double cloison + lame d'air de 5cm, et les murs intérieurs en simple cloison</li> <li>- Fondation : Semelles filantes ou isolées solidarisiées par les longrines rigides.</li> </ul>
Caractéristiques du site	Le sol est constitué par : des formations argileuses de couleurs variable allant du brun jaunâtre mais la nature demeure la même il s'agit d'argile caillouteuses avec passage plus ou moins riche en gravier ce qui explique la variation en dents de scie des pénétrogrammes.

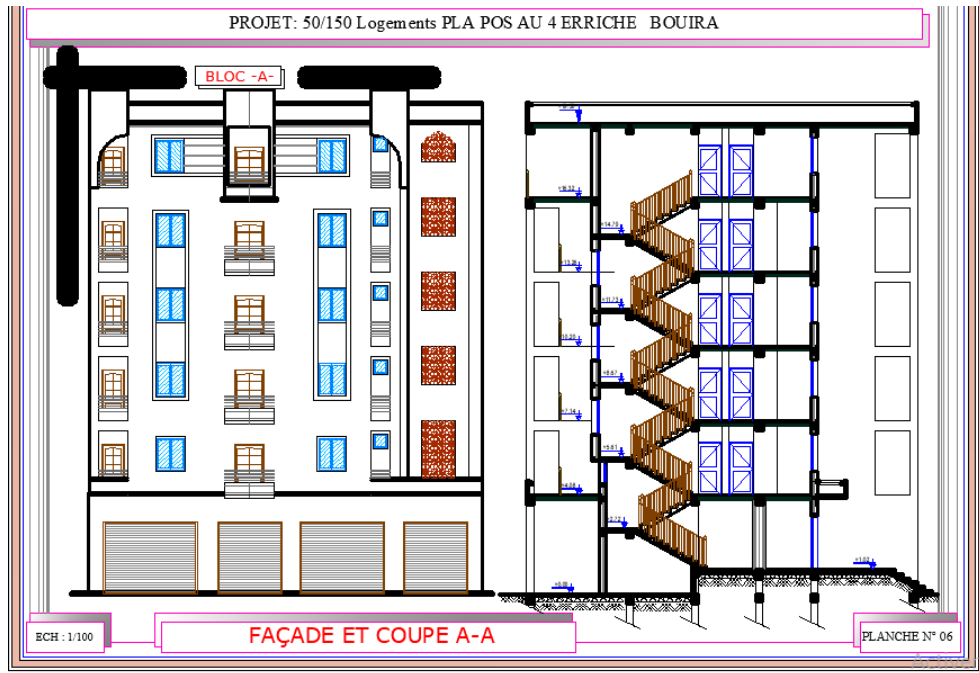


Figure IV. 1. Plan de façade et coupe A-A du bloc A

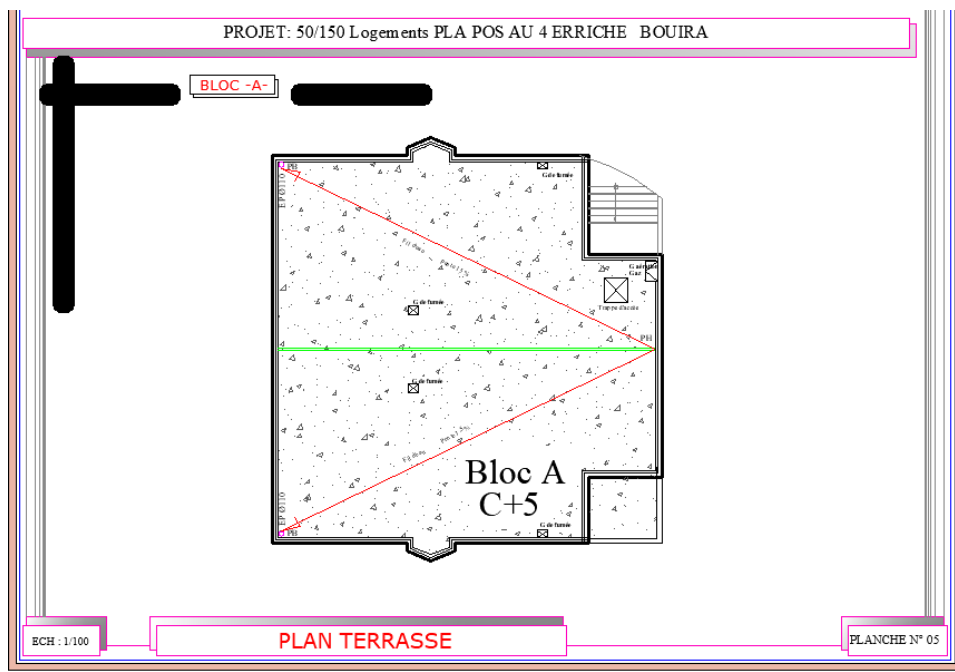


Figure IV. 2. Plan de terrasse

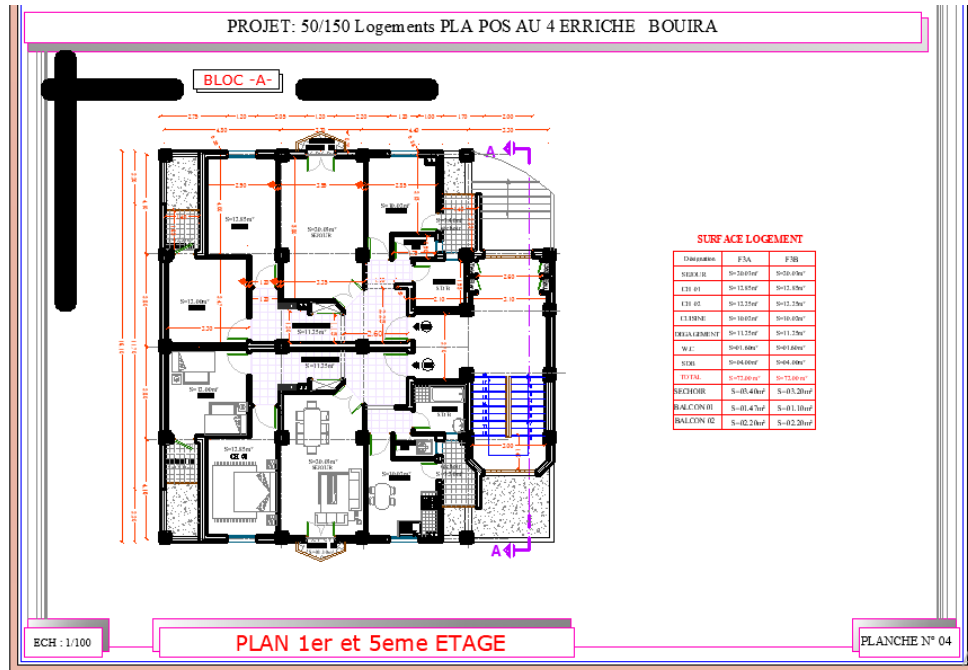


Figure IV. 3. Plan du 1er et 5ème étage

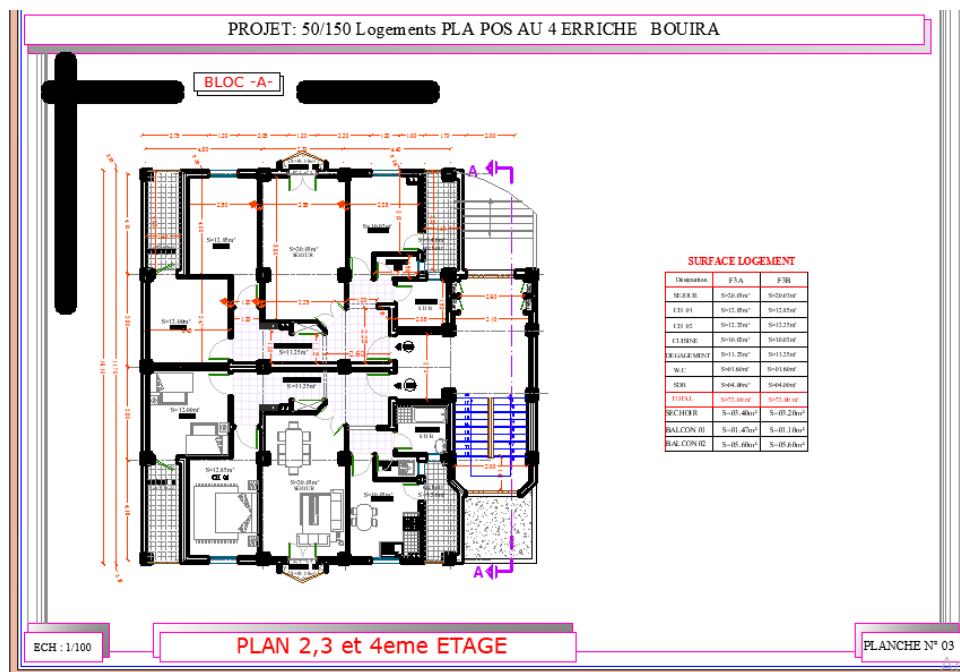


Figure IV. 4. Plan du 2,3 et 4ème étage



Tableau IV. 2. Présentation du bâtiment (bloc C)

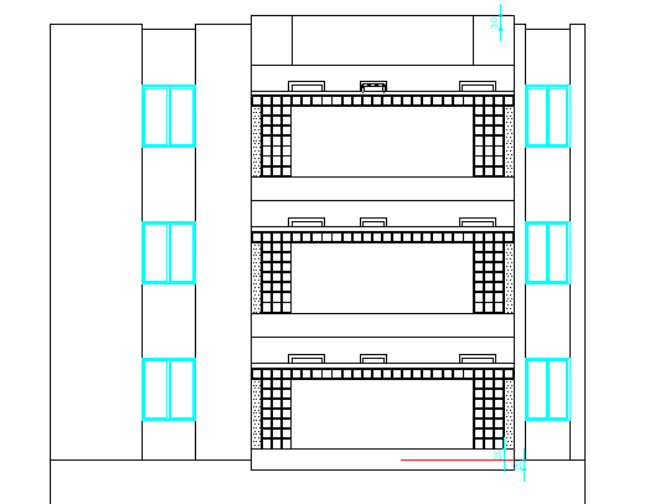
Bâtiment (bloc C)	
Présentation	RDC+ 2 étages contreventé par un système portiques auto-stables
Implantation	Bouira (wilaya de bouira), zone de moyenne sismicité IIa
Caractéristiques structurales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ossature : l'ouvrage est de 2 niveaux → contreventement portiques autostable</li> <li>- Plancher : 16+4 (cm)</li> <li>- Les escaliers : un seul type</li> <li>- Maçonnerie : murs extérieurs en double cloison + lame d'aire de 5cm, et les murs intérieurs en simple cloison</li> <li>- Fondation : Semelles isolées solidarisiées par les longrines rigides.</li> </ul>
Caractéristiques du site	Le sol est constitué par : des formations argileuses de couleurs variable allant du brun jaunâtre mais la nature demeure la même il s'agit d'argile caillouteuses avec passage plus ou moins riche en gravier ce qui explique la variation en dents de scie des pénétrogrammes.



**FACADE PRINCIPALE**

Activer Windows

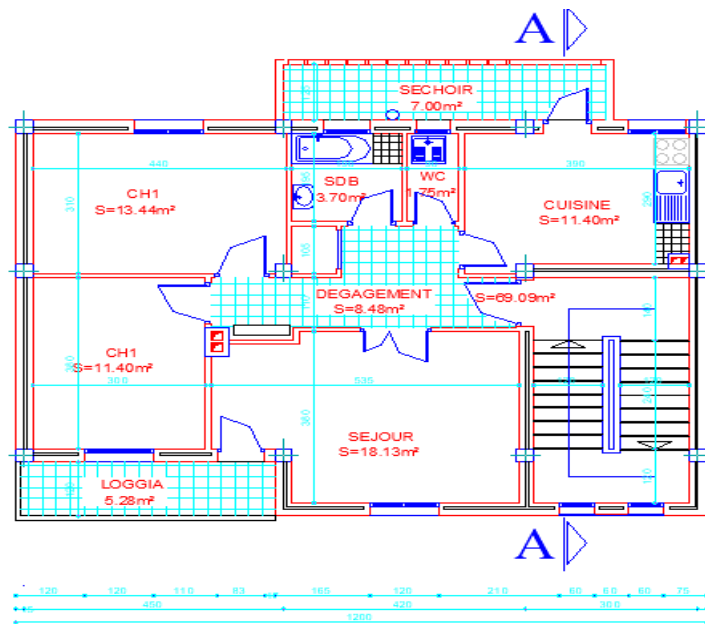
Figure IV. 7. Façade principale du bloc C



**FACADE POSTERIEURE**

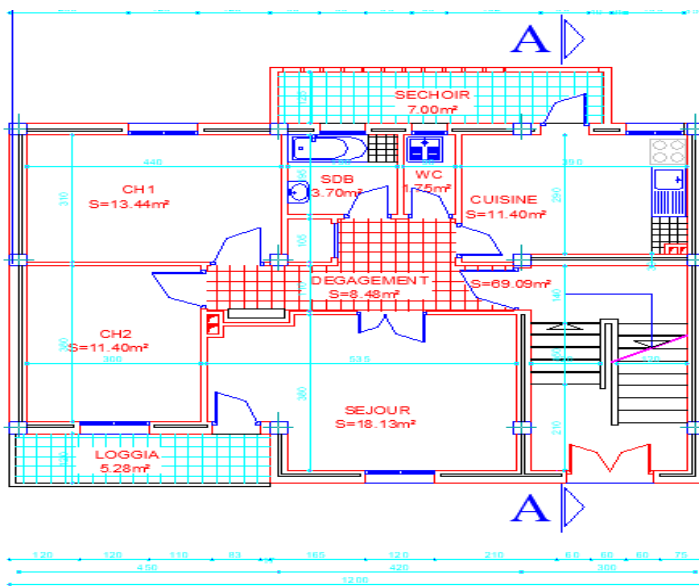
×

Figure IV. 8. Façade postérieure



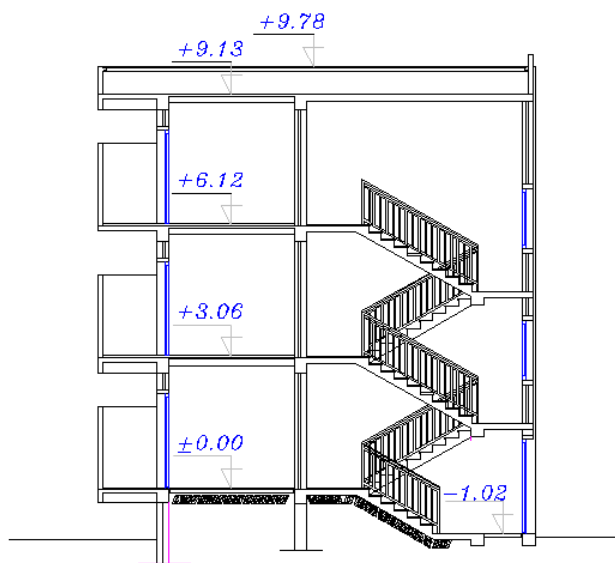
**ETAGE COURANT**

Figure IV. 9. Plan de l'étage courant



**REZ DE CHAUSSEE**

Figure IV. 10. Plan du RDC



**COUPE A-A**

Figure IV. 11. Coupe A-A du bloc C

### IV.3. Calcul des performances des IPs

➤ 1<sup>er</sup> cas d'étude :

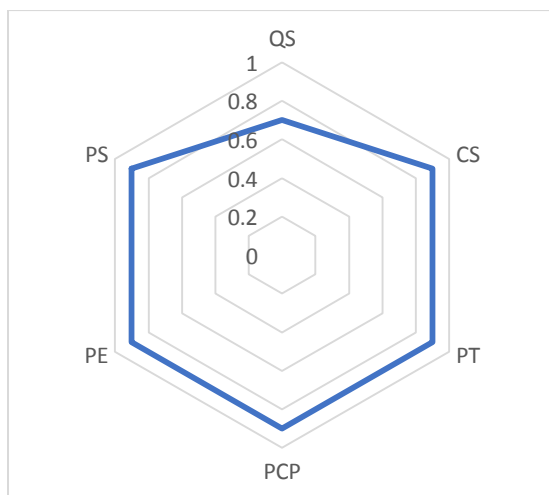


Figure IV. 12. Performance des IPs du critère StabSol (cas 01)

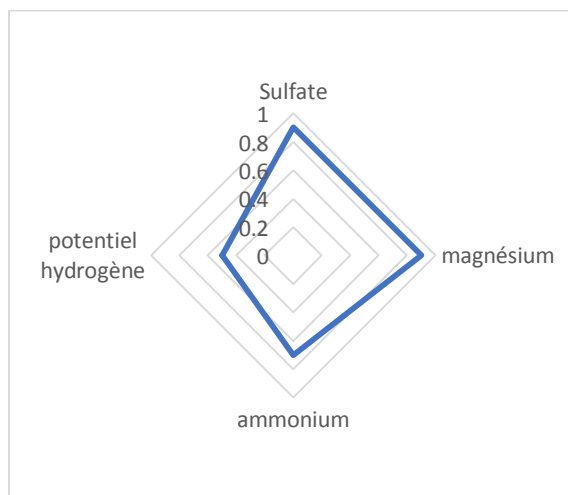


Figure IV. 13. Performance des IPs du critère AgrChim (cas 01)

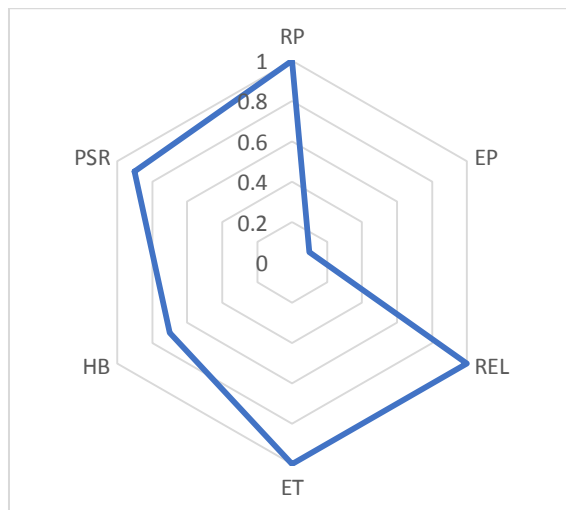


Figure IV. 14. Performance des IPs du critère ConcArch (cas 01)

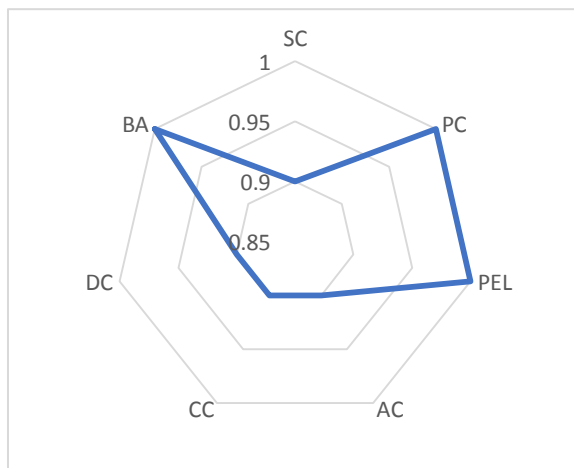


Figure IV. 15. Performance des IPs du critère SysStr (cas 01)

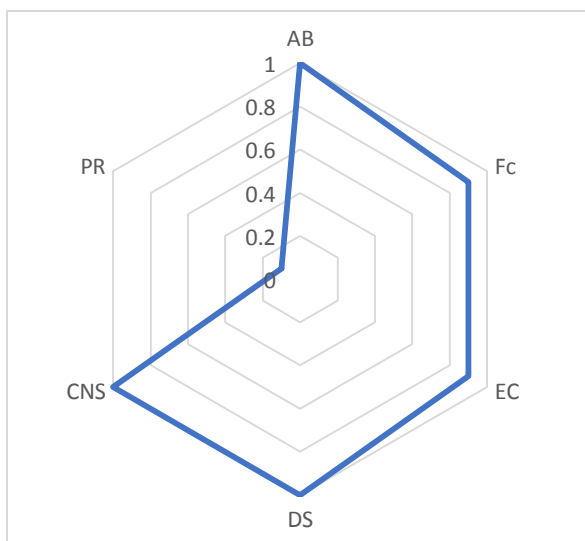


Figure IV. 16. Performance des IPs du critère EtatStr (cas 01)

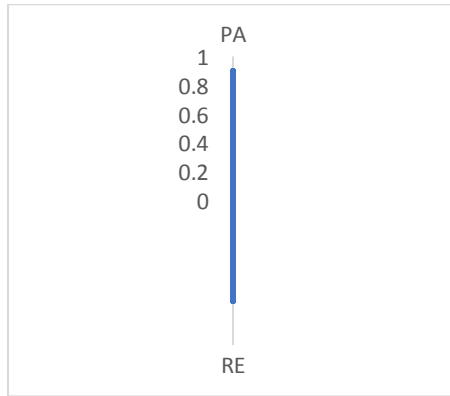


Figure IV. 17. Performance des IPs du critère Age (cas 01)

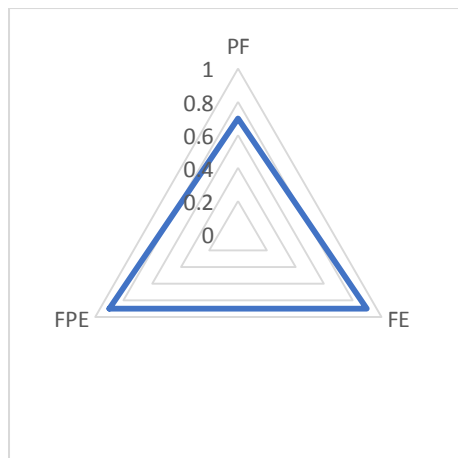


Figure IV. 18. Performance des IPs du critère Sexe (cas 01)

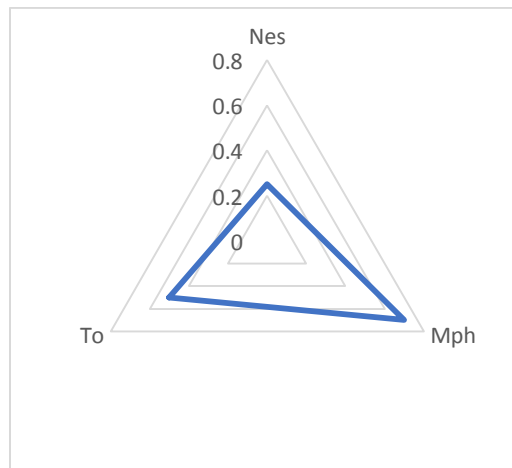


Figure IV. 19. Performance des IPs du critère QualVie (cas 01)

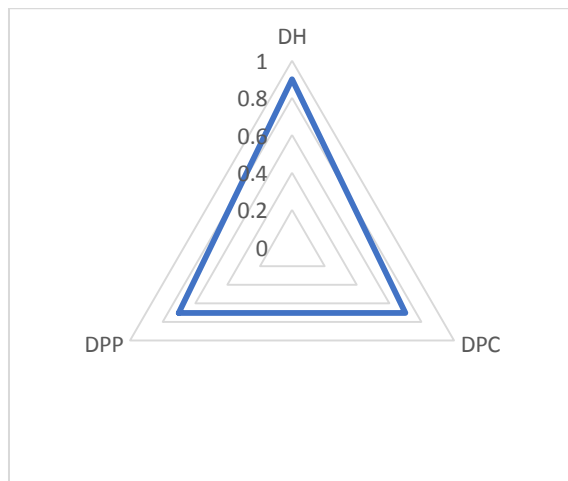


Figure IV. 20. Performance des IPs du critère Secour (cas 01)

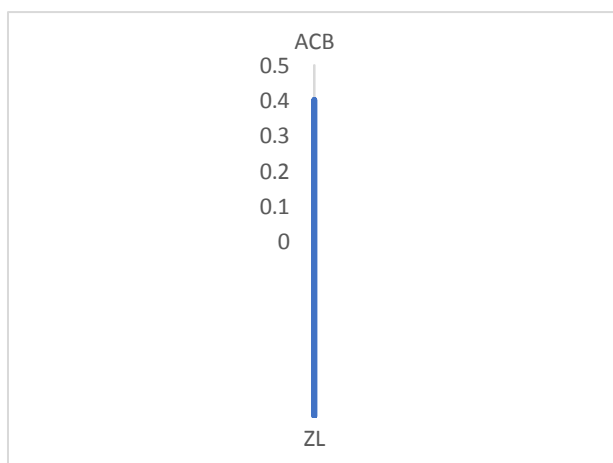


Figure IV. 21. Performance des IPs du critère Acces (cas 01)

➤ 2<sup>ème</sup> cas d'étude :

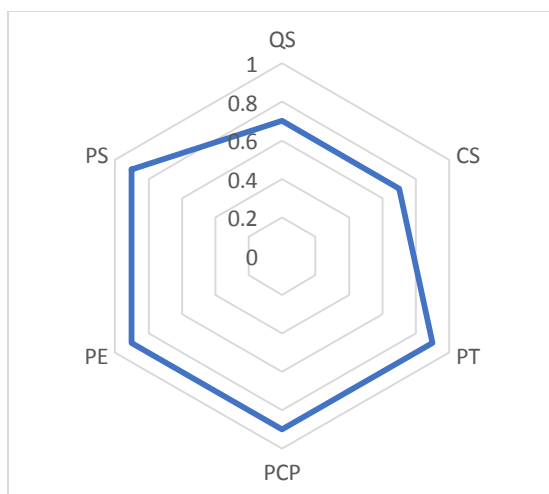


Figure IV. 22. Performance des IPs du critère StabSol (cas 02)

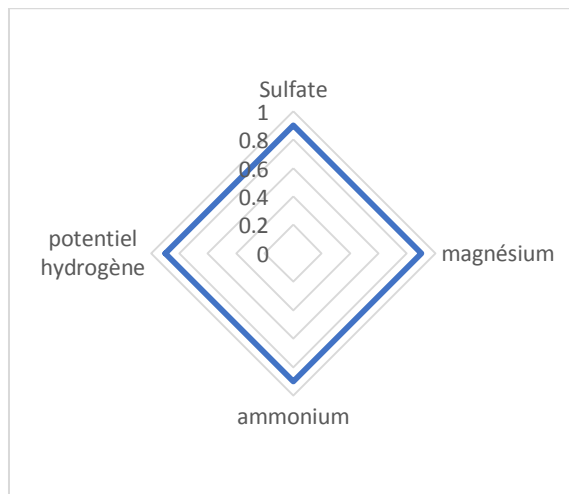


Figure IV. 23. Performance des IPs du critère AgrChim (cas 02)

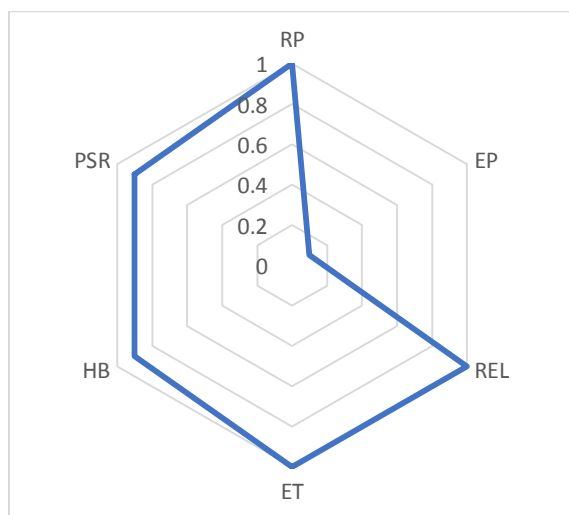


Figure IV. 24. Performance des IPs du critère ConcArch (cas 02)

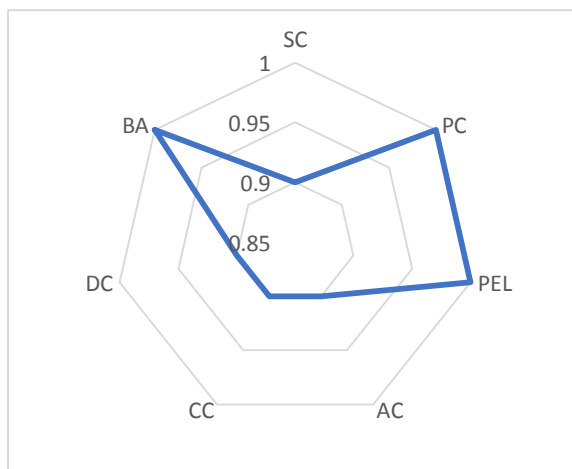


Figure IV. 25. Performance des IPs du critère SysStr (cas 02)

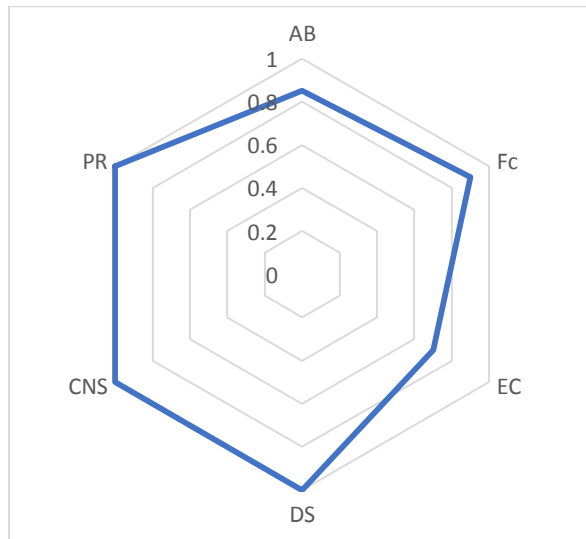


Figure IV. 26. Performance des IPs du critère EtatStr (cas 02)

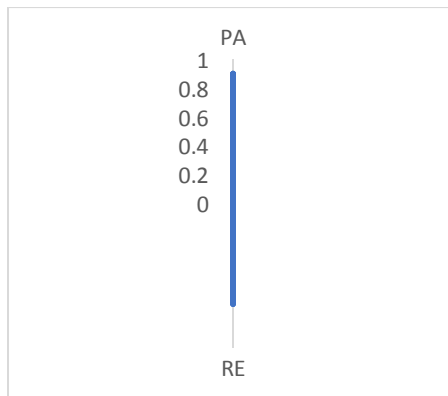


Figure IV. 27. Performance des IPs du critère Age (cas 02)

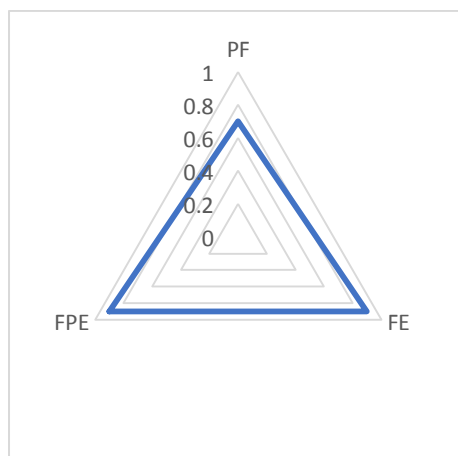


Figure IV. 28. Performance des IPs du critère Sexe (cas 02)

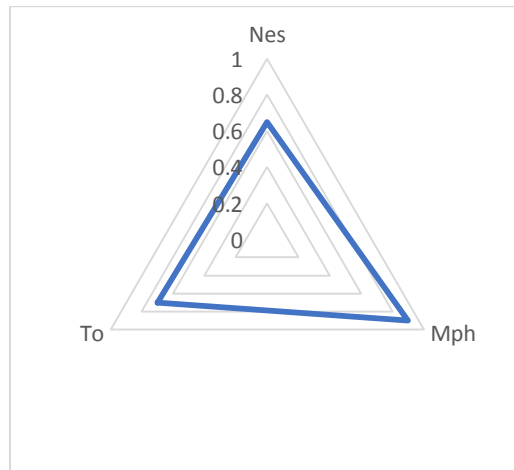


Figure IV. 29. Performance des IPs du critère QualVie (cas 02)

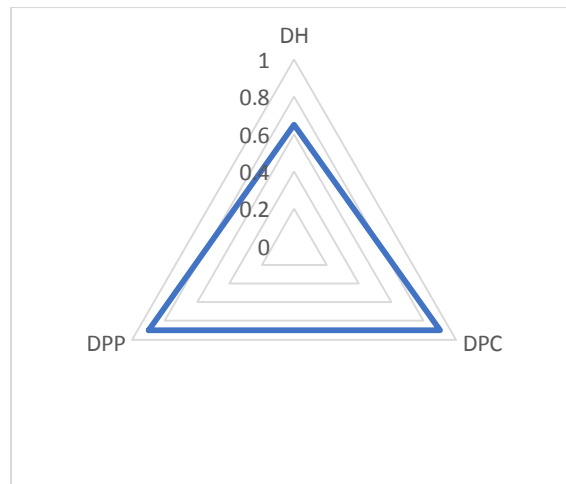


Figure IV. 30. Performance des IPs du critère Secour (cas 02)

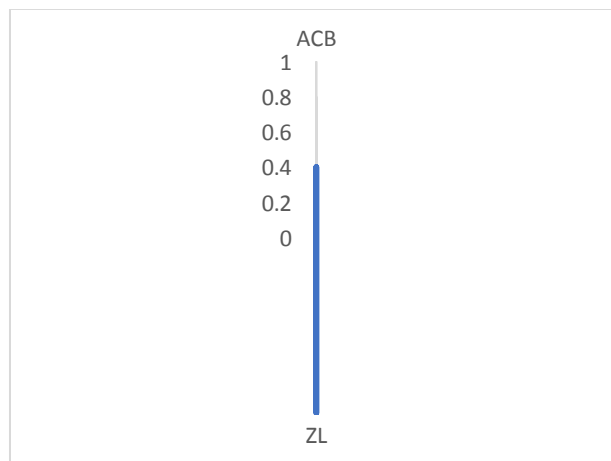


Figure IV. 31. Performance des IPs du critère Acces (cas 02)

## IV.4. Pondération des IPs – Méthode AHP

Dans cette étude, les coefficients de pondération (poids) sont calculés à l'aide de la méthode AHP. Les matrices de décision sont composées d'éléments  $a_{ij}$  qui représentent l'ordre de préférence entre indicateur/critère  $i$  et indicateur/critère  $j$ . Les valeurs  $a_{ij}$  sont évaluées par paires en utilisant l'échelle du Tableau III.41. (Moussaoui et Cherrared, 2021)

### IV.4.1. Pondération des IPs du critère Sexe

- **Etape 1** : Hiérarchisation des IPs par importance

**Premièrement** : On classe les IPs par ordre d'importance décroissant comme suit :

→ IP de degrés 1 : FPE

→ IP de degrés 2 : FE

→ IP de degrés 3 : PF

**Deuxièmement** : On attribue à chaque IPs un ordre de préférence à partir du tableau III.41 (Chapitre III) pour construire une matrice appelée « Matrice de décision ».

**Tableau IV. 3.** Attribution des ordres de préférences entre les IPs

	FPE	FE	PF
FPE	1	3	5
FE	1/3	1	3
PF	1/5	1/3	1

Ainsi, la matrice obtenue est :  $A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$

- **Etape 2** : Détermination des poids associés à chaque IPs

$$w = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{5}} + \frac{3}{3 + 1 + \frac{1}{3}} + \frac{5}{5 + 3 + 1} \\ \frac{\frac{1}{3}}{1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{5}} + \frac{1}{3 + 1 + \frac{1}{3}} + \frac{3}{5 + 3 + 1} \\ \frac{\frac{1}{5}}{1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{5}} + \frac{\frac{1}{3}}{3 + 1 + \frac{1}{3}} + \frac{1}{5 + 3 + 1} \end{bmatrix}$$

Ainsi les poids (Wi) obtenu sont :  $w = \begin{bmatrix} 0.6333 \\ 0.2605 \\ 0.1062 \end{bmatrix}$

- **Etape 3** : Vérification de la consistance des résultats

Nous avons :  $\begin{bmatrix} \lambda'_1 \\ \lambda'_2 \\ \lambda'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6333 \times \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{3} \\ \frac{1}{5} \end{bmatrix} + 0.2605 \times \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ \frac{1}{3} \end{bmatrix} + 0.1062 \times \begin{bmatrix} 5 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.9456 \\ 0.7901 \\ 0.3197 \end{bmatrix}$

Et :  $\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.0720 \\ 3.0330 \\ 3.0112 \end{bmatrix}$

Alors :  $\lambda_{max} = \frac{3.0720+3.0330+3.0112}{3} = 3.0387$

L'indice de consistance est :  $CI = \frac{3.0387-3}{2} = 0.0194$

RI est tiré du tableau III.42 (Chapitre III) suivant la taille de la matrice de décision. Notre matrice de décision est de (3x3) alors, RI = 0.58.

Finalement :  $CR = \frac{0.0194}{0.58} = 0.0334$

CR est inférieur à 0,1 ; donc l'attribution des poids est **acceptable**.

IV.4.2. Synthèse de calcul des pondérations

Tableau IV. 4. Calcul des poids des IPs

Critère	IPs	Matrice de décision	$w_i$	$\lambda'$	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	RI	CR
StabSol	CS	$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 7 & 9 & 9 \\ \frac{1}{5} & 1 & 3 & 4 & 5 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 3 & 4 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 2 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.5287</b>	3.5899	6.7900	6.2891	0.0578	1.2400	<b>0.0466</b>
	QS		<b>0.2053</b>	1.3399	6.5269				
	PCP		<b>0.1215</b>	0.7391	6.0834				
	PE		<b>0.0582</b>	0.3519	6.0517				
	PS		<b>0.0463</b>	0.2848	6.1531				
	PT		<b>0.0401</b>	0.2456	6.1293				
ConcArch	ET	$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 & 7 & 7 & 7 \\ \frac{1}{5} & 1 & 3 & 3 & 5 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 3 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.5054</b>	3.5643	7.0519	6.4545	0.0909	1.2400	<b>0.0733</b>
	REL		<b>0.2015</b>	1.3547	6.7235				
	RP		<b>0.1193</b>	0.7800	6.5390				
	PSR		<b>0.0873</b>	0.5259	6.0241				
	EP		<b>0.0432</b>	0.2678	6.1942				
	HB		<b>0.0432</b>	0.2678	6.1942				
AgrChim	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.2500</b>	<b>Vérification non nécessaire</b>					
	Mg <sup>++</sup>		<b>0.2500</b>						
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		<b>0.2500</b>						
	PH		<b>0.2500</b>						
SysStr	SC	$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 5 & 5 & 7 & 7 & 7 \\ \frac{1}{5} & 1 & 3 & 3 & 3 & 5 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 3 & 5 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 3 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.4246</b>	3.5840	8.4408	7.7655	0.1276	1.3200	<b>0.0967</b>
	AC		<b>0.1867</b>	1.5714	8.4176				
	CC		<b>0.1454</b>	1.1561	7.9496				
	DC		<b>0.1021</b>	0.7779	7.6189				
	PC		<b>0.0744</b>	0.5368	7.2173				
	BA		<b>0.0385</b>	0.2810	7.2930				
	PEL		<b>0.0283</b>	0.2099	7.4213				
EtatStr	FBC	$\begin{bmatrix} 1 & 7 & 7 & 7 & 9 & 9 \\ \frac{1}{7} & 1 & 3 & 5 & 5 & 7 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 5 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.5273</b>	4.0003	7.5859	6.4880	0.0976	1.2400	<b>0.0787</b>
	DS		<b>0.2086</b>	1.4148	6.7824				
	CNS		<b>0.1353</b>	0.8308	6.1419				
	EC		<b>0.0467</b>	0.2909	6.2311				
	AB		<b>0.0416</b>	0.2562	6.1589				
	PR		<b>0.0405</b>	0.2443	6.0278				
Age	PA	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.5000</b>	<b>Vérification non nécessaire</b>					
	RE		<b>0.5000</b>						
Sexe	FPE	$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.6333</b>	1.9456	3.0720	3.0387	0.0194	0.5800	<b>0.0334</b>
	FE		<b>0.2605</b>	0.7901	3.0330				
	F		<b>0.1062</b>	0.3197	3.0112				
Qualvie	To	$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 \\ \frac{1}{5} & 1 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.723</b>	2.262	3.128	3.061	0.0308	0.5800	<b>0.053</b>
	MPH		<b>0.193</b>	0.5836	3.023				
	Nes		<b>0.082</b>	0.2488	3.034				
Secour	DPC	$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.6333</b>	1.9456	3.0720	3.0387	0.0194	0.5800	<b>0.0334</b>
	DH		<b>0.2605</b>	0.7901	3.0330				
	DPP		<b>0.1062</b>	0.3197	3.0112				
Acces	ACB	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.5000</b>	<b>Vérification non nécessaire</b>					
	ZL		<b>0.5000</b>						

Tableau IV. 5. Calcul des poids des critères

Critère	IPs	Matrice de décision	$w_i$	$\lambda'$	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	RI	CR
VulnSol	StabSol	$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.7500</b>	Vérification non nécessaire					
	AgrChim		<b>0.2500</b>						
VulnStr	SysStr	$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.6333</b>	1.9456	3.0720	3.0387	0.0194	0.5800	<b>0.0334</b>
	ConcArch		<b>0.2605</b>	0.7901	3.0330				
	EtatStr		<b>0.1062</b>	0.3179	3.0112				
VulnSoc	Secour	$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 5 & 7 & 7 \\ \frac{1}{5} & 1 & 3 & 5 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.5300</b>	3.1160	5.8792	5.4242	0.1061	0.1200	<b>0.0947</b>
	QualVie		<b>0.2294</b>	1.2933	5.6387				
	Acces		<b>0.1226</b>	0.6591	5.3746				
	Sexe		<b>0.0736</b>	0.3693	5.0164				
	Age		<b>0.0444</b>	0.2314	5.2123				
VulnEnv	ZS	$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.6333</b>	1.9456	3.0720	3.0387	0.0194	0.5800	<b>0.0334</b>
	CCU		<b>0.2605</b>	0.7901	3.0330				
	Amoy		<b>0.1062</b>	0.3179	3.0112				

Tableau IV. 6. Calcul des poids des objectifs

Critère	IPs	Matrice de décision	$w_i$	$\lambda'$	$\lambda$	$\lambda_{max}$	CI	RI	CR
VulnBât	VulnStr	$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 6 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 & 4 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$	<b>0.5577</b>	2.3210	4.1621	4.0792	0.0264	0.9000	<b>0.0293</b>
	VulnSol		<b>0.2594</b>	1.0646	4.1034				
	VulnSoc		<b>0.1124</b>	0.4515	4.0175				
	VulnEnv		<b>0.0705</b>	0.2845	4.0338				

### IV.5. Calcul des performances – Méthode MSP

Pour notre processus d'agrégation, nous avons choisi la MSP. En effet, parmi les techniques d'agrégation complète, c'est la méthode la plus utilisée. Janssen (2001) affirme que "la somme pondérée est la méthode d'agrégation la plus utilisée dans les études de décision". La méthode de la somme pondérée est utilisée pour sa clarté et sa simplicité. En effet, cette approche est relativement simple : la note globale est calculée comme la pondération moyenne des scores standardisés. (Moussaoui et Cherrared, 2021)

$$PC_j = \sum_{i=1}^n PI_{ji} \times w_i$$

➤ 1<sup>er</sup> cas d'étude :

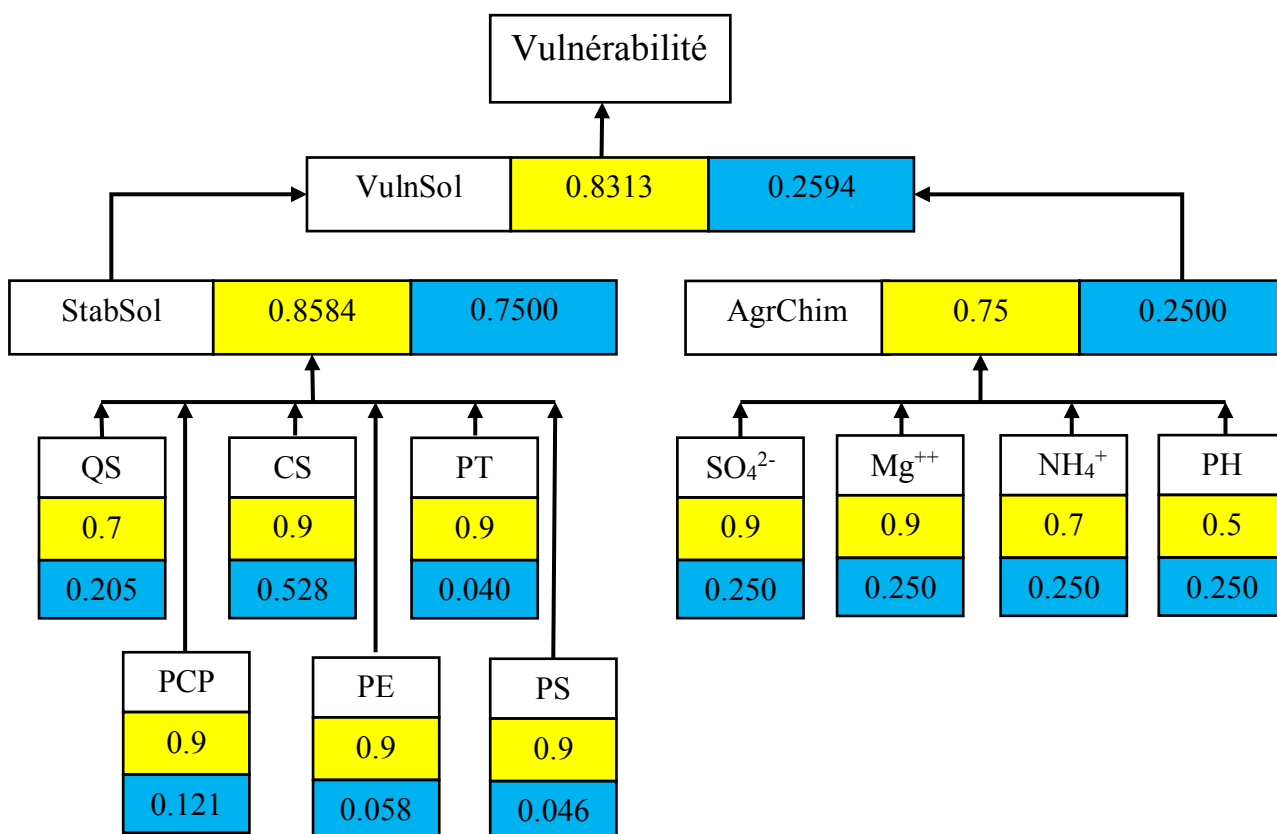


Figure IV. 32. Agrégation des IPs du l'objectif VulnSol

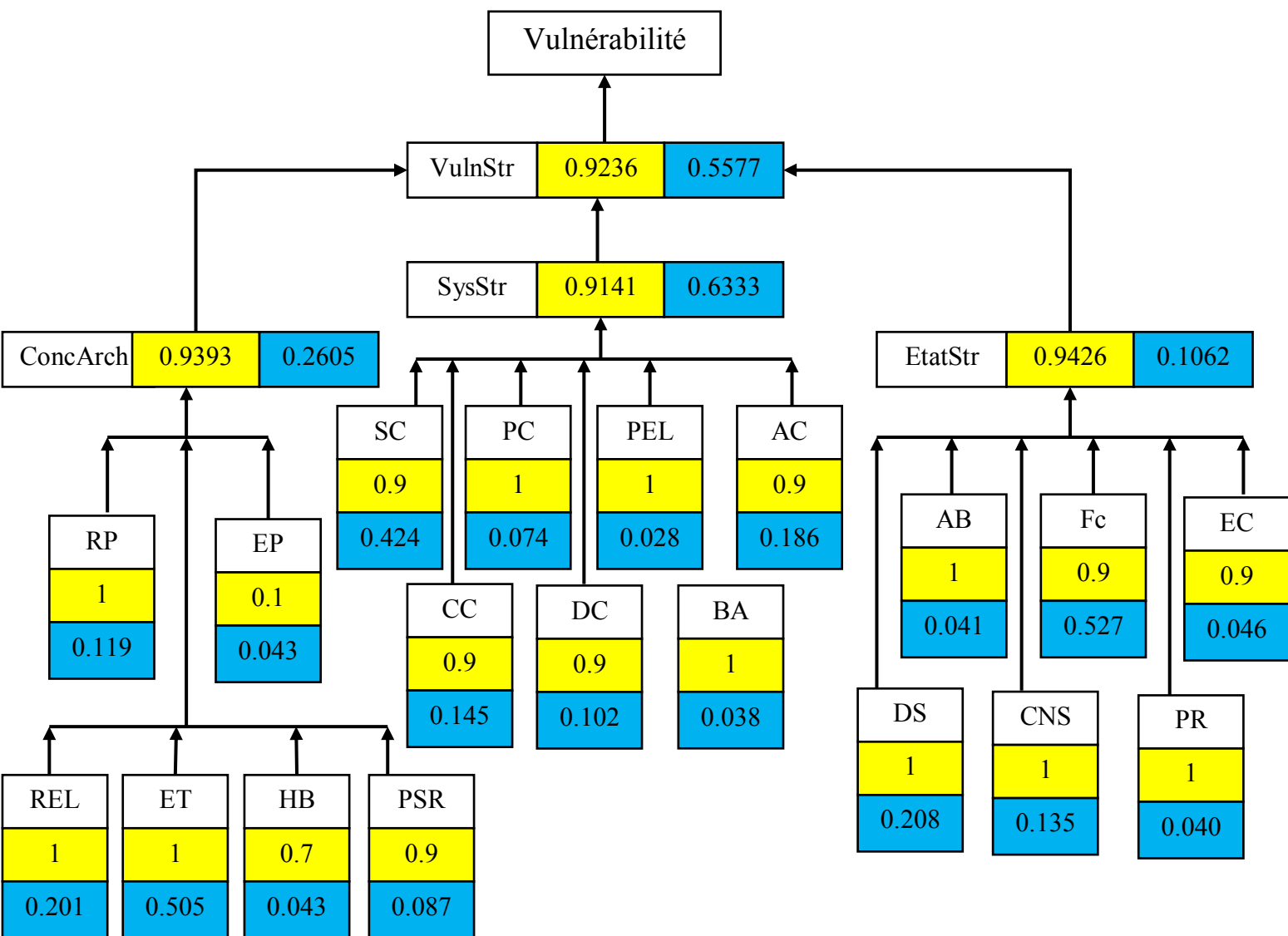


Figure IV. 33. Agrégation des IPs du l'objectif VulnStr

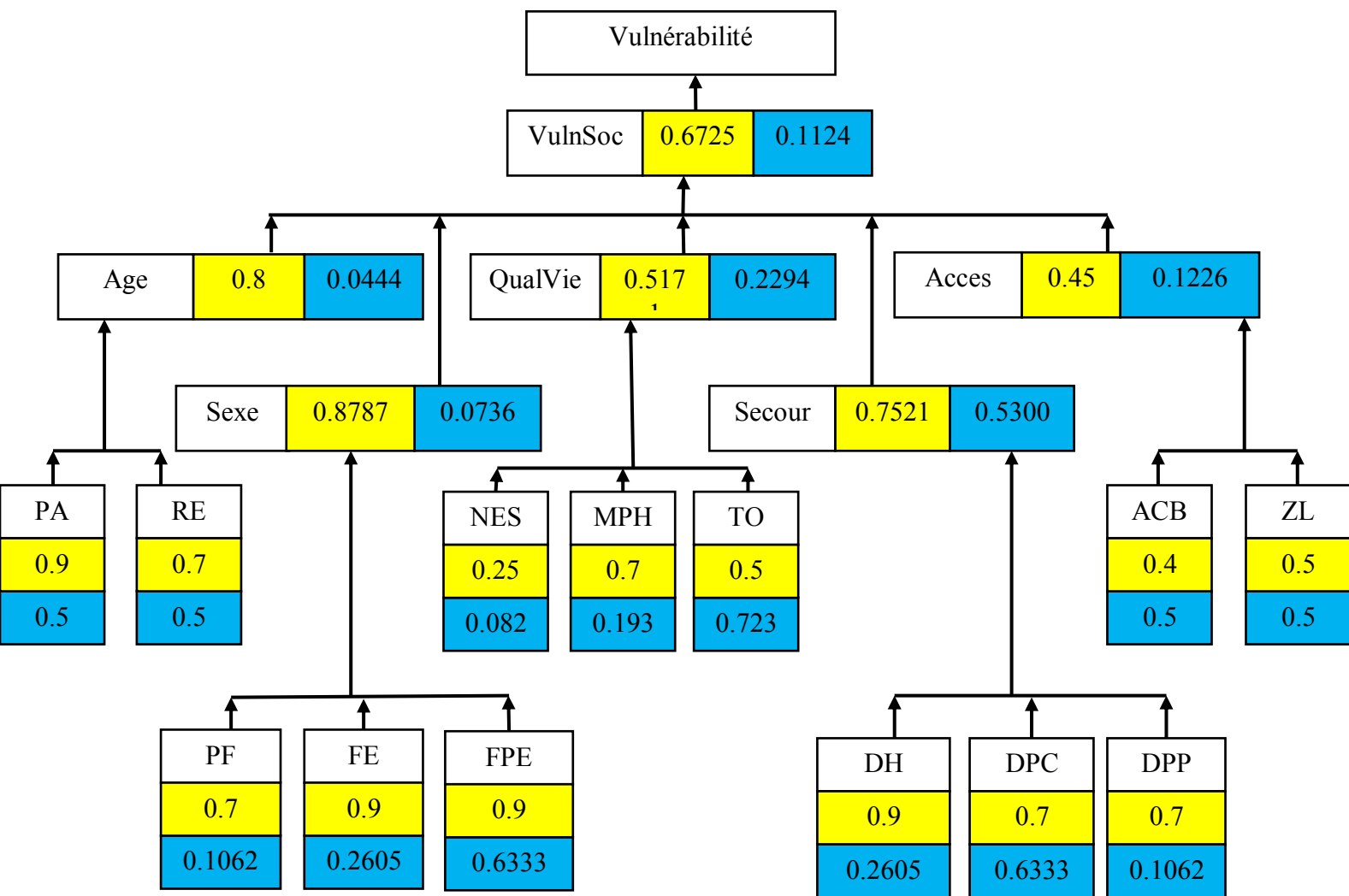


Figure IV. 34. Agrégation des IPs du l'objectif VulnSoc

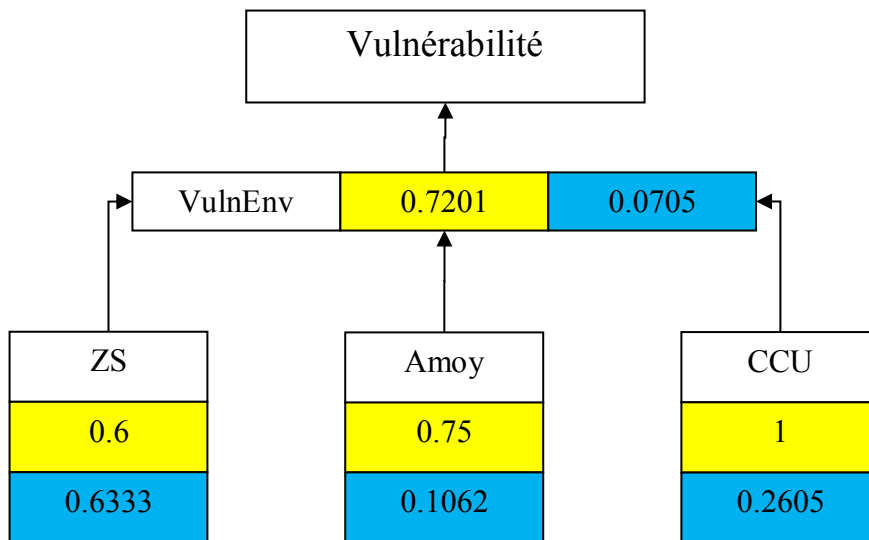


Figure IV. 35. Agrégation des IPs de l'objectif VulnEnv

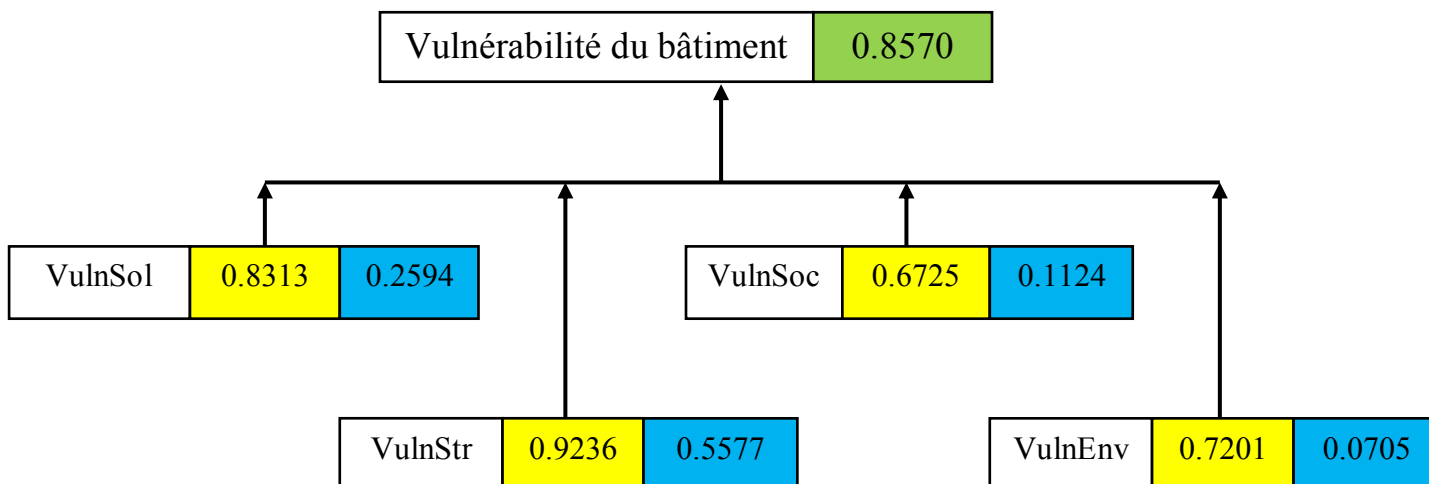


Figure IV. 36. Calcul de la valeur de la vulnérabilité du bloc A

➤ 2ème cas d'étude

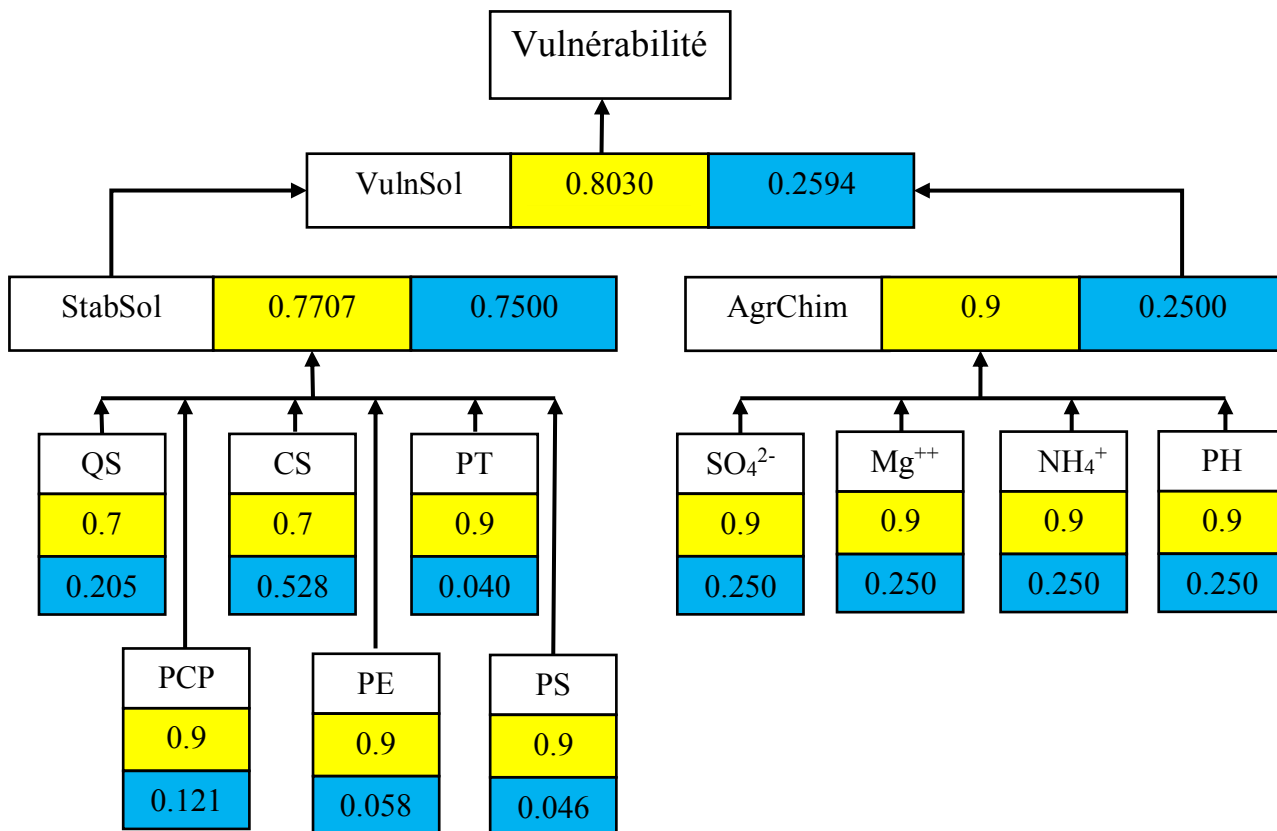


Figure IV. 37. Agrégation des IPs de l'objectif VulnSol

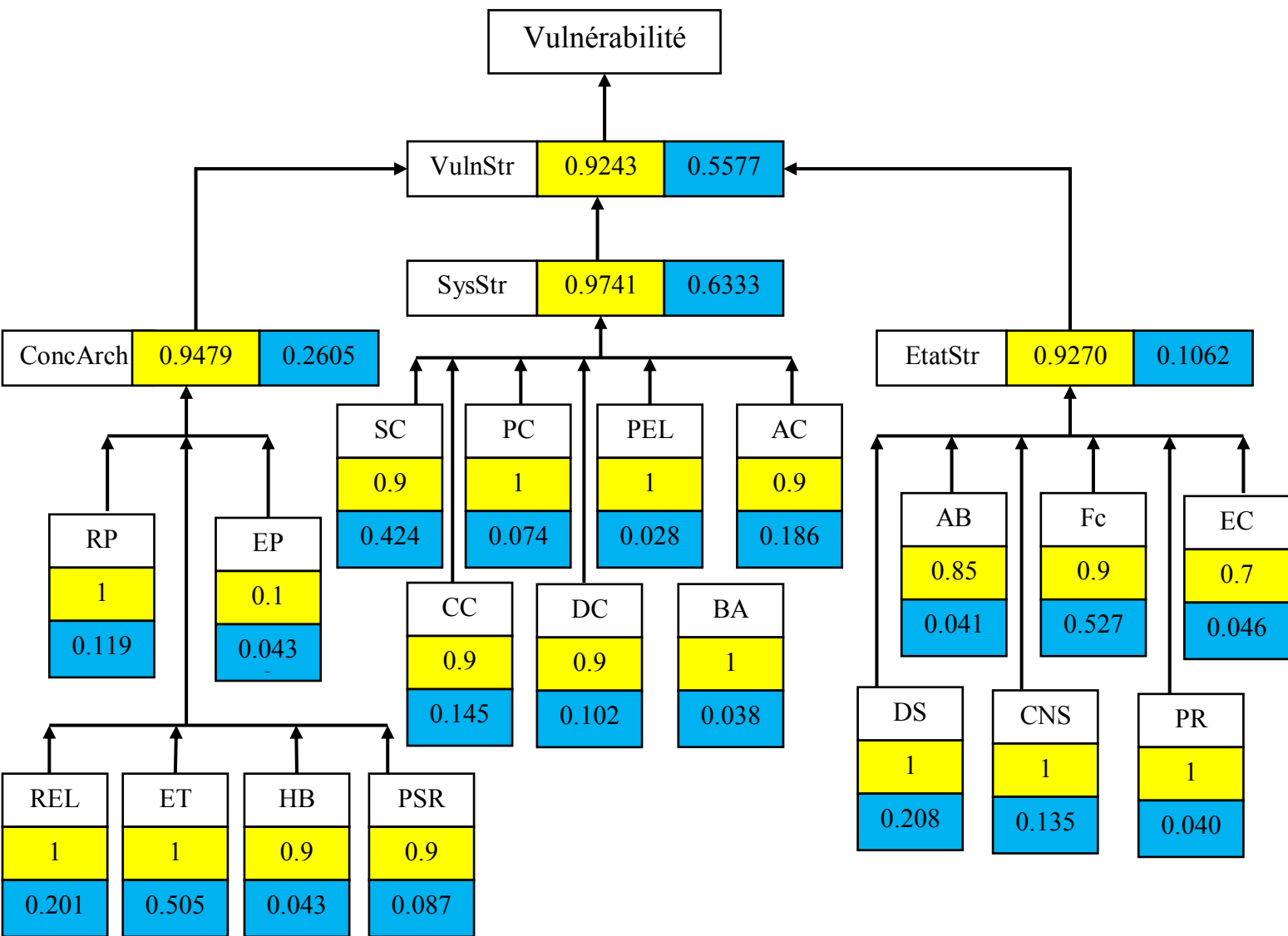


Figure IV. 38. Agrégation des IPs du l'objectif VulnStr

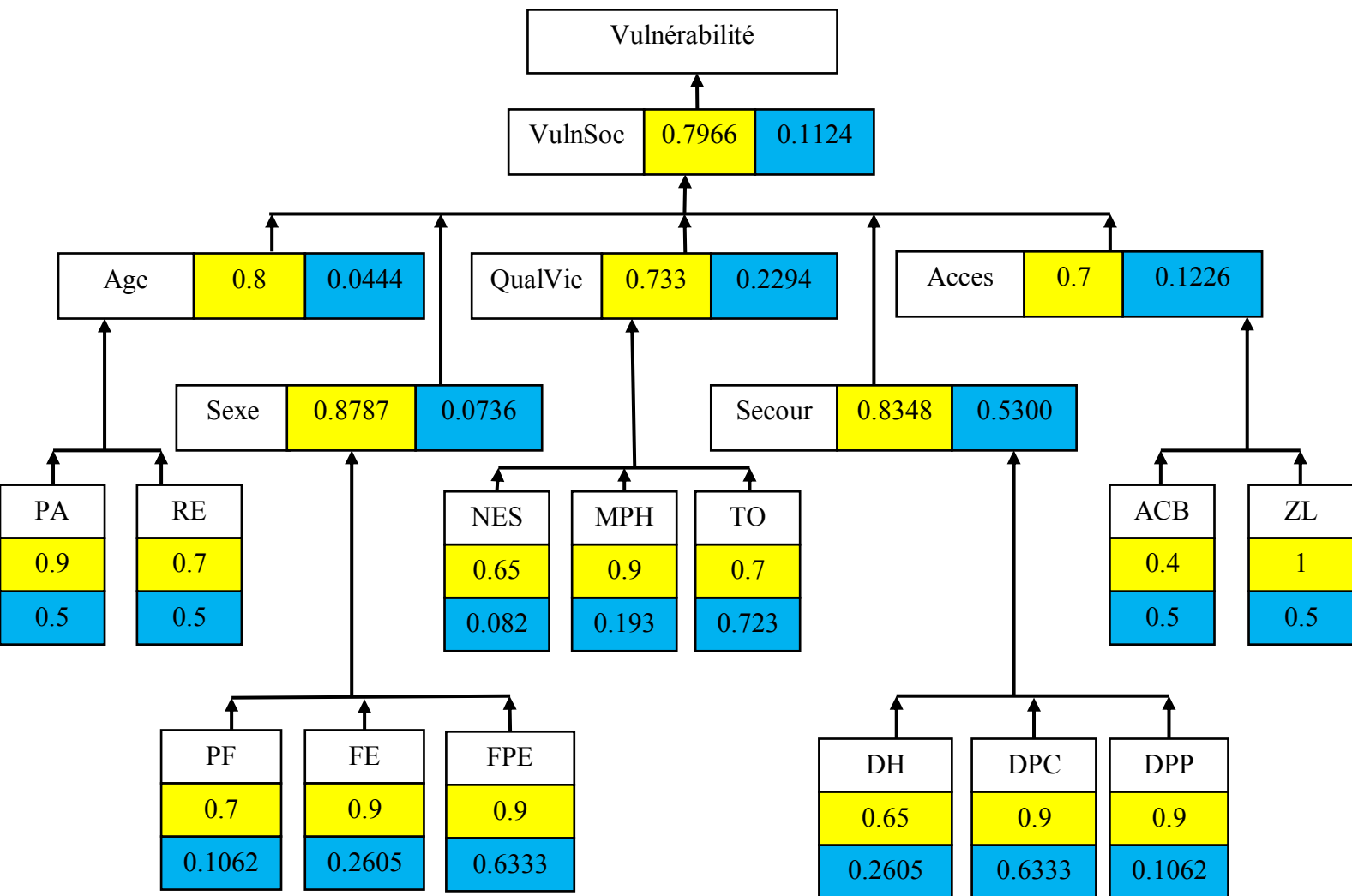


Figure IV. 39. Agrégation des IPs du l'objectif VulnSoc

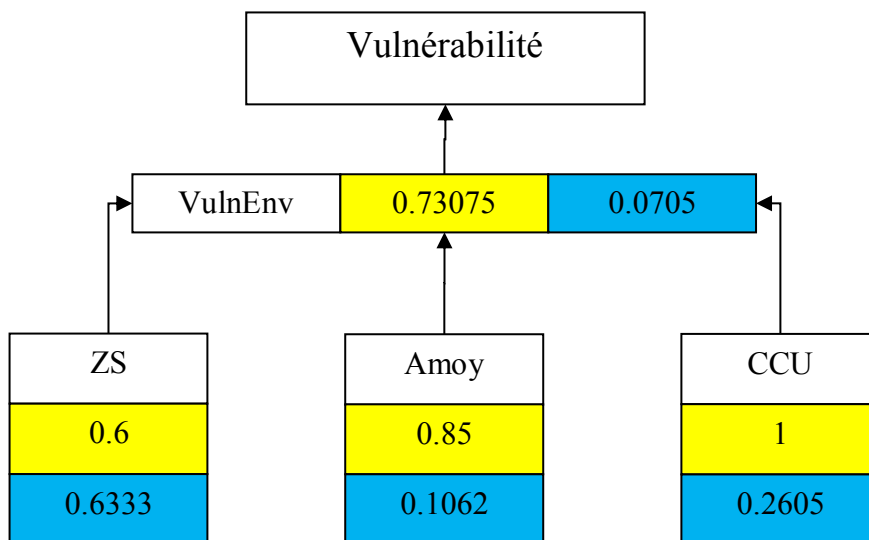


Figure IV. 40. Agrégation des IPs de l'objectif VulnEnv

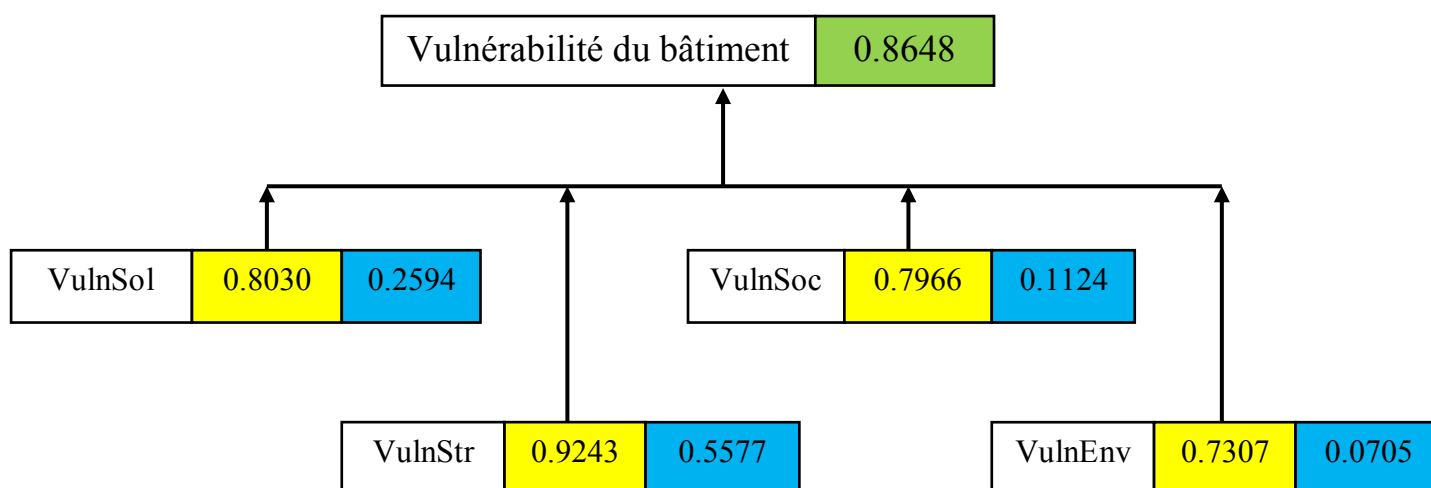


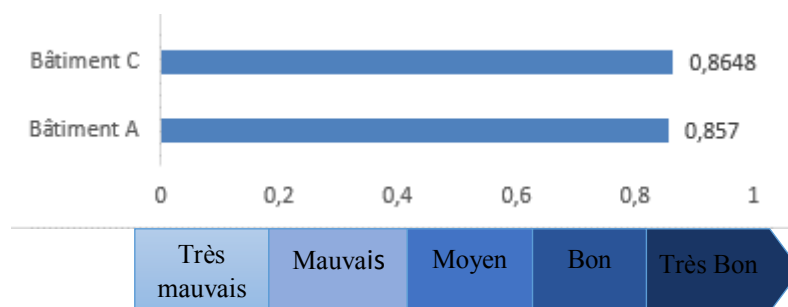
Figure IV. 41. Calcul de la valeur de la vulnérabilité du bloc C

## IV.6. Discussion des résultats

Dans ce chapitre, on a choisi deux exemples de bâtiments à usage d'habitations à la wilaya de bouira dans le but d'application de la méthodologie présentée dans le chapitre trois. Les résultats obtenus, ont été présentés sous différentes formes (tableaux, courbes radars et organigramme). En dernière partie nous allons discuter les résultats obtenus par cette application.

On a entamé notre application par le calcul des valeurs des IPs en se basant, d'une part, sur les méthodes de calcul définies dans le troisième chapitre et, d'autre part, sur les études d'architecture, de génie civil et de géotechnique sans oublier une étude statistique dans le but d'attribuer des valeurs aux indices de performance (IPs) de la vulnérabilité sociale.

Ensuite, nous avons étudié chaque IP seule en lui donnant une performance en fonction de la valeur obtenue de son calcul. Dans nos deux exemples les performances sont favorables et satisfaisantes, dans notre cas nos exemples sont définies successivement comme suit : le premier construit en 2008 et le deuxième en 2016, construit avec les normes et les techniques de construction en vigueur et les restrictions de contrôle de qualité de réalisation moderne



**Figure IV. 42.** Performance sismique des bâtiments des cas étudiés

Cependant, les IPs niveau d'éducation et de sensibilisation (NES), accessibilité au bâtiment (ACB) ne présentait pas une performance complète. Aussi, l'IP élancement en plan (EP) présente une très faible performance à cause de l'élancement élevé du bâtiment en plan. Nous avons aussi les IPs (Zs) et (Amoy) présentent une performance moyenne puisque le bâtiment est dans une zone moyenne sismicité ayant enregistré quelques séismes dans la période de service du bâtiment.

Dans la deuxième étape nous nous sommes intéressés aux calculs des poids des indicateurs. Pour cela nous avons appliqué la méthode AHP.

- En premier lieu, nous avons pondéré les IPs du critère (StabSol), dans notre démarche de construction de la matrice de décision, nous avons favorisé la catégorie de sol par rapport à la qualité de sol et la proximité de changement de pente parce que celle-ci est mesurée le degré de résistance du sol aux charges verticales et conditionne ainsi les types

de fondation à utiliser et la grandeur de la structure à implémenté. Nous avons ensuite préféré la proximité d'eau et la proximité de soutènement par rapport à l'indicateur qui définit la pente générale du terrain puisque ce dernier peut être contrôlé avec les travaux de terrassements suivant les exigences du type de construction et les règles de bonne exécution suivant les règles de l'art.

- Ensuite, nous avons pondéré les IPs du critère (Agrchim) , nous avons classé tout indicateur tel que l'agressivité de sulfate ( $\text{SO}_4^-$ ) , l'agressivité du magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ) le PH du sol dans la même classe selon leur importance vu que tous ces paramètres ont presque la même influence sur le béton enterré (béton de fondation) à cause des réactions chimiques avec la matière essentielle qui le constitue .
- Ensuite, nous avons adopté ce même raisonnement pour classer les différents IPs du reste des critères.
- Les critères et les objectifs de vulnérabilité sont aussi pondérés avec cette philosophie de préférence et en fonction des connaissances de l'expert.

Dans la deuxième étape nous nous sommes intéressés aux calculs des poids des indicateurs. Pour cela nous avons appliqué la méthode AHP. Les résultats obtenus nous ont permis de classer les paramètres de vulnérabilité par ordre d'importance.

L'attribution des performances est grandement influencée par la prise de décision primaire lors de la construction des matrices de décision. Cette étape est entachée par une petite part de subjectivité de l'utilisateur (décideur). Cependant, la méthode offre une mesure de vérification des jugements avec l'indice *CR*.

Nous avons enfin, calculé les performances de tous les paramètres de vulnérabilité des différents niveaux par l'application de la méthode MSP. C'est une méthode très utilisée dans la littérature, simple et exacte. Les indices de vulnérabilité sismique (IPs) obtenus nous permettent de localiser les bâtiments les plus vulnérables en cas de secousse sismique. Ceci fournirait sans doute une information très utile aux localités pour préparer et/ou d'améliorer leurs plans d'urgences en cas de catastrophes.

## IV.7. Conclusion

Durant ce chapitre nous avons appliqué la méthode développée dans le chapitre III. Nous avons commencé par le calcul des différentes performances après avoir estimé leurs valeurs à partir des méthodes de calcul développées. La classification des indicateurs de vulnérabilité selon leurs importances sur une échelle 0-9 a été faite en utilisant la méthode AHP pour ensuite calculer leurs coefficients de pondération.

Nous avons présenté les résultats obtenus sous différentes formes (tableaux et courbes radars) que nous avons ensuite discutés et argumentés.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

L'évaluation de la vulnérabilité sismique constitue un élément primordial dans la philosophie de réduction des effets sismiques. Pour concrétiser cela, l'utilisation des facteurs de vulnérabilité a été récemment proposée et acceptée dans plusieurs pays dans le monde.

Il est clair que ce projet est un projet à long terme qui s'inscrit dans le cadre d'un programme général de recherche, on a pu tirer une étude simplifiée qui a deux objectifs principaux : d'une part c'est de développer une méthodologie globale d'évaluation de la vulnérabilité des villes Algériennes vis-à-vis les séismes, de l'autre part une application de cette méthodologie était nécessaire donc on a choisis quelques exemples sur le parc immobilier, situé à la ville de BOUIRA, pour bien tester notre recherche.

Dans le but de bien répondre aux différentes questions posées sur notre problématique, nous avons adopté comme premier chapitre déjà nommé « recherche bibliographique » qui a pour but de définir les différentes méthodes d'évaluation de la performance sismique des bâtiments existants en soulignant des méthodes multicritères d'aide à la décision comme noyau de la méthodologie mise en place. Ensuite, nous avons mis la lumière sur quelques informations sur quelques statistiques concernant le parc résidentiel en Algérie ainsi que son historique sismique.

Pour répondre à la problématique de l'évaluation de la vulnérabilité de ces bâtiments, nous avons adopté une démarche multicritère combinée par deux approches complémentaires que nous avons rapporté dans le troisième chapitre de ce mémoire.

Finalement le dernier chapitre a été consacré à l'application de la méthodologie sur des cas réels choisis dans la ville de Bouira.

À l'issue de cette recherche nous tirons les conclusions suivantes :

- Les valeurs de la vulnérabilité obtenue pour le bloc A et C étaient respectivement égales à 0,8570 et 0,8648. Ces valeurs reflètent que les parcs résidentiels nouvellement construits.
- La liste des IP utilisée n'est pas exhaustive mais pourrait être améliorée en intégrant plus d'IP à la méthodologie.
- Les méthodes de calcul, les échelles de performance peuvent aussi être améliorées.
- L'AHP, malgré sa complexité, est une méthode très exacte permettant de vérifier la cohérence des relations d'importance entre indicateurs. La méthode des sommes pondérées offre l'avantage de la clarté et de la simplicité d'utilisation.

Ce travail de mémoire a englobé un sujet vaste et encore novateur, les perspectives de recherche sont donc nombreuses.

- À l'état actuel, nous n'avons pas pu évaluer la performance de tous les critères et des indicateurs, pour cause de manque des références de vérifications ou des normes d'appréciation, ou bien pour l'inexistence des données nécessaires pour calculer les indicateurs, et parfois à cause de la non homogénéité des échelles de performance des critères. Cette perspective est l'une des priorités à aborder par la suite.

- La pondération des IPs renferme une petite part de subjectivité lors de la construction des matrices de décision qui peut être corrigé par une étude de variantes.
- Le parc ancien doit présenter des valeurs de performance largement au-dessous de celle-ci. Ce travail pourrait faire l'objet de recherche futures.

# **Bibliographie**

## Références

- Abdelheq, G. (2017, Mai 24). Evaluation de la vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville - cas de la ville de constantine. Constantine , Génie Civil, Algérie .
- Abderrahim, A. (2019). Simulation sismique avec une approche SMA (Systèmes Multi Agents). Application de la méthode RISK-DZ a la ville d'Arzew. Arzew, Département Génie Civil, Oran.
- Agrebi, M. (2018, Avril 12). Méthodes d'aide a la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection dans un environnement certain/incertain: cas de la localisation des centres de distribution. Sfax, Département Informatique, Tunisie.
- Algérie presse service*. (2018, juin 21). Récupéré sur <https://www.aps.dz/economie/75380-temmar-ples-de-3-6-millions-de-logements-réalises-entre-1999-et-2018>
- Amir, B. (2019, juillet 22). L'aide a la décision de renouveler les canalisations d'Alimentation en Eau Potable. jijel, Département de Génie Civil et Hydraulique, Algérie.
- Armaş, I. (2012). Multi-criteria vulnerability analysis to earthquake hazard of Bucharest, Romania. *Natural Hazards*, vol. 63 n°2, 1129–1156. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0209-2>
- Battier, J. (2002). Guide d'évaluation de la présomption de vulnérabilité du bâti existant – Cahier technique AFPS n°24. *Association Française du Génie Parasismique*. AFPS, Paris Cedex 07. <http://www.afps-seisme.org/>
- BENDEHIBA, S. (2013, juin 04). Application de la méthode RISK-UE sur les constructions mostaganemoise. mostaganem, génie civil, Algérie.
- Benderbouz mohammed Ilyes, A. H. (2019, juillet 8). Evaluation de la vulnérabilité des Bâti existante dans la ville de Mostaganem par la methode RISK-UE . MOSTAGANEM, Génie Civil et architecture , Algérie .
- Boutin, M. (2013, Novembre ). Comportement dynamique et modélisation des écoles avec murs de maçonnerie non-armé. QUEBEC, Génie civil, CANADA .
- CHERIFI, F. (2016, decembre 11). Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants en Algerie . Tizi-ouzou, Génie civil, Algérie.
- CGS, Centre National de Recherche Appliqué en Génie Parasismique. (2003). Document Technique Réglementaire (DTR B-C 2 48), Règles Parasismiques Algériennes RPA99 / version 2003. République Algérienne Démocratique et Populaire, Ministère de l'Habitat. Alger, Algérie. 115pp. <http://www.cgs-dz.org/index.php/fr/service-en-ligne-telechargement/110-commande-de-documents>

- DJAFER HENNI Imane, D. S. (2013, Octobre 9-10). Analyse de la vulnérabilité d'un bâtiment administratif situé dans une zone de moyenne sismicité en Algérie . chlef , Algérie .
- DUCO, F. (2012, Novembre 20). Méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments existants a partir d'une instrumentation in situ. Toulouse, Département Génie mécanique, France.
- Dwyer.A, Zoppou.C, Nielsen.O, Day.S, Roberts.S. (2004). Quantifying Social vulnerability: A methodology for identifying those at risk to natural hazards, Geoscience australia. ISBN: 1 920871 09 8. 92 pp.
- GÖRENER, A. (2012) : Comparing AHP and ANP: An Application of Strategic Decisions Making in a Manufacturing Company. International Journal of Business and Social Science.
- JEANDIN , T. (2015) : MÉTHODE DE CHOIX DES ATTACHEMENTS POUR LA FIN DE VIE DES PRODUITS ,ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL.
- K.GABLA, E. (2016, Février). La selection de projet dans un contexte de developpement durable en présence d'incertitude . QUEBEC, CANADA.
- Khadidja, B. (2012, mai 28). Risque sismique et urbanisation regard croisé sur la ville d'alger . Constantine , département d'architecture et d'urbanisme , Algérie.
- L.Mammar, M. A. (2016, février 19). Indice de vulnérabilité des constructions existantes a Oran (Indices of vulnerability of existing buildings in Oran). Oran, Département d'Architecture , Algérie.
- M.MARTELES, A. -S.-S. (2015, septembre 2). Evaluation de la vulnérabilité du Bati face au risque sismique - VILLE DE NICE - NICE , France .
- M.Mouzzoun, O. ,. (2012, mai 27). Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments en béton armé par l'utilisation des courbes de fragilité ( seismic vulnerability assesement of reinforced concrete buildings using frgility curves ) . Rabbat , Génie civil, Marroc.
- Maaloul, S. (2016, MARS 04). Développement d'un mécanisme de Hndover basé sur le concept de la conscience contextuelle ( Context Awareness ) dans des réseaux sans fil hétérogènes garantissant un accès ubiquitaire . Carthage , TUNIS.
- Ministère de l'habitat. (2005). Journal Officiel De La République Algérienne N° 04. <https://www.ilo.org/dyn/natlex/docs/ELECTRONIC/69772/68794/F-1049933677/DZA-69772.pdf>. 19-21 pp.
- Mouad EL Khoudri, I. L. (2020). Synthèse comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments. *Journal of Water science and environment technologie*, 531.
- Moussaoui, F. (2018). Contribution à l'évaluation de la durabilité des bâtiments d'habitation en Algérie. Thèse de doctorat. Université de Bejaia, Algérie.

- Moussaoui, F., & Cherrared, M. (2015). Contribution to assessment of the seismic performance of residential buildings in the Algerian context. In SSCS'2015, RILEM International Conference Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures. Rio de Janeiro, Brazil.
- Moussaoui, F., Cherrared, M., Kacimi, M. A., & Belarbi, R. (2018). A genetic algorithm to optimize consistency ratio in AHP method for energy performance assessment of residential buildings — Application of top-down and bottom-up approaches in Algerian case study. *Sustainable Cities and Society*, 42 (August 2017) 622-636.
- ONS, (2019). Office Nationale des Statistiques. <https://www.ons.dz/>.
- Perrault, M. (2006, Aout 07). Evaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments a partir de mesures in situ. Grenoble, France.
- Phillipe GUEGUEN, C. L.-A. (2007, juillet). Analyse de la vulnérabilité sismique dans un pays a sismicité modérée. Grenoble, France.
- Rachid, B. (2017). Analyse multicritère d'aide a la décision. Mostaganem, Département Mathématique et Informatique, Algérie.
- RPA, (2003). Règlement Parasismique Algérien 99- Version 2003 . Ministre de l'habitat. Document technique réglementaire DTR BC 2 48. Centre national de recherche appliquée en génie parasismique.
- SAATY, T. L. (1999) : *Fondamental of the Analytic Network Process*. Pittsburgh, University of Pittsburgh, USA.
- Soumana, F. (2018, juillet 16). Décision multicritère : un système de recommandation pour le choix de l'opérateur d'agrégation . TOULOUSE , FRANCE .
- vulnérabilité sismique de bâti existant : approche d'ensemble. (2005, juillet). *cahier technique*.
- YOUANCE, s. (2010, MARS 17). Une évaluation de la vulnérabilité sismique des églises du QUEBEC . MONTREAL , CANADA.
- (DREC/SVGC-SIG), CETE Méditerranée. *Comparaison de méthodes qualitatives d'évaluation de la vulnérabilité des constructions aux séismes*. France, Novembre 2008.