

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 :
HASSANI Fadhila

TAHIR Ghania

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie civil :

Filière : Génie Civil

Spécialité : structures

Thème :

**Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation en
Algérie – Partie 3 : Finalisation de la méthodologie et application à la ville de Bouira**

Devant le jury composé de :

Mr. SAOUDI Brahim
Dr. MOUSSAOUI Fahem
Mr. AOUADI Abdelhak

MAA UAMOB
MCB UAMOB
MAB UAMOB

Président
Encadrant
Examineur

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu de nous avoir donné la capacité d'achever ce travail de mémoire de fin d'étude, et nous avoir aidé à dépasser toutes les difficultés rencontrées.

En second lieux n'oublions pas de remercier chaleureusement nos parents, et nous exprimons nos profondes reconnaissances et nos sincères remerciements à notre encadreur de mémoire, Mr. MOUSSAOUI.F, pour tous le temps qu'il nous a consacrés, ses directives précieuses et pour sa disponibilité durant toute la période de travail.

Un grand merci aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font pour juger et examiner notre travail. Et à tous nos enseignants du département de Génie Civil Bouira qui ont contribués de près ou loin à l'élaboration de ce projet.

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

FADHILA & GHANIA

Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail :

A ma chère mère, à mon cher père, pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes sœurs Siham et Meriem,

A mes amis : Karim Ali, Zougha Bilal, Hassani Fadhila, Djouabi Sara, Theldji Iman, Daci Abd Raouf, Houssam et Hanan de leur soutien et leur encouragement durant toute ma recherche.

GHANIA

Du fond cœur, je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, qui m'ont poussé vers le succès. Merci pour votre aide. Vous êtes toujours les plus importants dans ma vie. Qu'Allah me les garde durant toute ma vie.

A mes frères

A mes sœurs

A mon mari et sa famille

A ma grande mère

A mes amis

A mon binôme

FADHILA

Table des matières

Sommaire

Remerciement.....	i
Dédicaces.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	x
Nomenclature et abréviation.....	xiii
Résumé.....	xvi
Abstract.....	xvii
الملخص.....	xviii
Introduction générale.....	1

Chapitre 01 : Vulnérabilité des bâtiments d’habitation – Bibliographie

I.1	Introduction.....	5
I.2	Vulnérabilité – contexte générale.....	5
I.2.1	Définitions.....	5
I.2.2	Types de vulnérabilité.....	6
I.2.3	Historique et domaine d’application.....	6
I.2.4	Facteurs de la vulnérabilité.....	7
I.2.5	Cartographie des aléas et de la vulnérabilité.....	9
I.3	La vulnérabilité dans domaine de la construction.....	9
I.3.1	Définition du risque.....	9
I.3.2	Historique de l’étude de la vulnérabilité sismique des bâtiments.....	12
I.3.3	Facteurs affectant la vulnérabilité sismique des bâtiments.....	13
I.4	Vulnérabilité des bâtiments d’habitation.....	16
I.4.1	Intérêt de l’évaluation de la vulnérabilité des bâtiments.....	16
I.4.2	Méthodologies d’évaluation de la vulnérabilité des bâtiments.....	17

I.5	Méthodes multicritères d'aide à la décision –Un outil faible pour l'évaluation de la vulnérabilité.....	28
I.5.1	Définition et terminologie	28
I.5.2	Approche multicritère	29
I.5.3	L'aide à la décision multicritère.....	30
I.5.4	Les approches multicritères.....	30
I.5.5	Domaine d'application	32
I.5.6	Processus d'aide à la décision multicritère	32
I.5.7	Méthodes multicritères d'aide à la décision (MMAD)	34
I.5.8	Méthodes d'aide à la décision les plus utilisés dans la littérature	42
I.5.9	Application des MMAD dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments d'habitation.....	44
I.6	Conclusion.....	47

Chapitre 02 :Vulnérabilité des bâtiments d'habitation en Algérie - État des lieux

II.1	Introduction	50
II.2	Vulnérabilité du territoire algérien – Contexte général	51
II.2.1	Problématique de la vulnérabilité du territoire national.....	51
II.2.2	Vulnérabilité sismique du territoire algérien.....	62
II.2.3	Acteurs de la vulnérabilité en Algérie.....	64
II.3	Le secteur résidentiel en Algérie – données et indicateurs.....	66
II.3.1	Parc résidentiel algérien : de l'époque colonial à aujourd'hui	66
II.3.2	Structure et distribution de l'habitation en Algérie	73
II.3.3	Etat des constructions du parc résidentiel	78
II.3.4	Gouvernance du secteur	78
II.4	Problématique de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation en Algérie..	79
II.4.1	Historique de la sismicité	79
II.4.2	Problématique de la vulnérabilité du secteur	81
II.4.3	Acteurs de la vulnérabilité dans le secteur résidentiel	83
II.5	Conclusion.....	83

Chapitre 03 :Développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation en Algérie

III.1	Introduction	85
-------	--------------------	----

III.2	Méthodologie d'évaluation proposée	85
III.2.1	Structure de la méthodologie.....	85
III.2.2	Approches Top-down et Bottom-up : deux approches opposées ou complémentaires ?	87
III.3	Approche diagnostic descendante – "Top-down	87
III.3.1	Identification des IPS	87
III.3.2	Méthodes de calcul.....	89
III.3.3	Echelle de performance	94
III.4	Approche « Bottom-up » Agrégation multicritère	105
III.4.1	Description du processus d'agrégation adopté.....	105
III.4.2	Méthode de la somme pondérée (MSP)	105
III.4.3	Méthode AHP.....	106
	Hiérarchisation des indicateurs par importance	107
	Comparaison des indicateurs par importance	108
	Détermination des poids associés à chaque indicateur	109
	Vérification de la consistance de résultat.....	109
III.5	Conclusion.....	110

Chapitre 04 :Application de la méthodologie proposée sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans la ville de Bouira

IV.1	Introduction	113
IV.2	Présentation des cas d'étude	113
IV.2.1	Cas d'étude n°01 : 126 logements à l'ancienne ville de Bouira.....	113
IV.2.2	Cas d'étude n°02 : Projet 2000 logements AADL	114
IV.2.3	Cas d'étude n°03 : Logements sociaux sis à Ait Laaziz	115
IV.3	Application de la méthodologie.....	117
IV.3.1	Cas d'étude n°01	117
IV.3.2	Cas d'étude n°02	123
IV.3.3	Cas d'étude n°03	129
IV.4	Pondération des IPs – Utilisation de la méthode AHP	132
IV.4.1	Exemple d'application : Pondération des IPs du critère Sexe.....	132
IV.4.2	Synthèse des calculs des poids des IPs.....	133
IV.4.3	Synthèse des calculs des poids des critères	135
IV.4.4	Synthèse des calculs des poids des objectifs	135

IV.5	Calcul des performances – Méthode MSP	135
IV.5.1	Cas d'étude n°01	136
IV.5.2	Cas d'étude n°02	140
IV.5.3	Cas d'étude n°03	144
IV.6	Discutions des résultats obtenus	146
IV.6.1	Pondérations des IPs.....	146
IV.6.2	Pondération des critères	148
IV.6.3	Pondération des objectifs	149
IV.6.4	Performances obtenues par niveaux intermédiaires	149
IV.6.5	Indice de vulnérabilité sismiques des cas d'études	153
IV.7	Conclusion.....	154
	Conclusion générale	160
	Bibliographie	159

Liste des figures

Chapitre 01

Figure I.1. Organigramme de classification des différents facteurs et indicateurs de vulnérabilité.....	8
Figure I.2. Représentation de l'approche de la vulnérabilité (Golossof, 1999)	9
Figure I.3. Représentation schématique du risque sismique	12
Figure I.4. Organigramme conceptuelle des méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments.....	18
Figure I.5. Schématique des modèles d'évaluation de la vulnérabilité et des risques sismiques	20
Figure I.6. Procédure d'évaluation structurale (ASCE)	21
Figure I.7. Processus de décision multicritère (Nafi et Wery, 2009)	33
Figure I.8. Recherche de la solution optimum (Brunner et Starkl 2004)	34

Chapitre 02

Figure II.1. Population algérienne de 1966 à 2021 (ONS, 2022).....	51
Figure II.2. Répartition de la population en Algérie (ONS, 2015).....	52
Figure II.3. Population en chômage en Algérie 2009-2019 (ONS, 2020).....	52
Figure II.4. Pauvreté en Algérie 1988-2019 (en pourcentage) (source : revue de science sociales, 2019).....	53
Figure II.5. Exportation de bien et de services (\square du PIB) (Banque mondiale, 2021).....	54
Figure II.6. Production et exportation de gaz.....	55
Figure II.7. Evolution des exportations des produits pétroliers	55
Figure II.8. Produits importés par l'Algérie	55
Figure II.9. Balance économique de l'Algérie de 2010 à 2020 (Banque mondiale, 2021).....	56
Figure II.10. Schématisation de la vulnérabilité et de l'aléa d'inondation en Algérie.....	58
Figure II.11. Gaz à effet de serre par habitation (Perspective monde, 2022).....	59
Figure II.12. Emissions totales de gaz à effet de serre (KT e-CO ₂) (Perspective monde, 2022)	59
Figure II.13. Consommation d'électricité en Algérie (perspective monde, 2022).....	61
Figure II.14. Consommation de gaz en Algérie (Perspective monde, 2022)	61
Figure II.15. Consommation d'énergie (Kg de pétrole par habitation équivalence) Algérie (Perspective monde, 2022)	61

Figure II.16. Carte des plaques tectoniques (Freepik, 2022).....	62
Figure II.17. Zones sismiques et degré de vulnérabilité des territoires en Algérie (MHAT, 2004).....	63
Figure II.18. Acteurs de la vulnérabilité dans différents secteurs en Algérie	65
Figure II.19. Exemple de construction en Algérie avant 1830.....	66
Figure II.20. L'Algérie à l'époque coloniale.....	67
Figure II.21. Evolution de parc de logement de 1962 à 1990	69
Figure II.22. Distribution de logement en fonction de leur type 1999-2018.....	72
Figure II.23. Distribution de logement en fonction de leur type 1999-2018.....	72
Figure II.24. Le parc résidentiel en Algérie à l'horizon 2030 (ONS, 2022)	73
Figure II.25. Habitat rural : Répartition des logements inscrits et des livraisons par Wilaya 1999 à 2005 (ONS, 2022)	74
Figure II.26. Habitat rural : Répartition des logements inscrits et des livraisons par Wilaya 2007 à 2009 (ONS, 2022)	74
Figure II.27. Habitat rural : Répartition des logements inscrits et des livraisons par wilaya - Tous programmes confondus de 2009 à 2011 (Source : Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville).....	75
Figure II.28. Habitat rural : Répartition des logements ruraux inscrits par Wilaya (Hors auto-construction) -Tous programmes confondus- Années 2014 à 2017 (Source : Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville).....	75
Figure II.29. Habitat Urbain : Répartition des logements et des livraisons par Wilaya 1999 à 2005 (Source : Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville)	76
Figure II.30. Habitat Urbain :Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés) par Wilaya - Tous programmes confondus - Années 2007 à 2009 (Source: Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville)	77
Figure II.31. Répartition des logements urbain et rural livrés par wilaya (hors auto construction) Tous programmes confondus de 2015 à 2017 (Source : Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville).....	77
Figure II.32. Type de construction résidentiel en Algérie (ONS, 2014)	78
Figure II.33. Gouvernance de secteur résidentiel en Algérie	78
Figure II.34. Acteurs de la vulnérabilité sismique dans le secteur résidentiel algérienne	83

Chapitre 03

Figure III.1. Méthodologie adoptée pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique pour un bâtiment d'habitation.....	86
Figure III.2. Echelle de performance de l'indicateur « SS ».....	94
Figure III.3. Echelle de performance de l'indicateur « TS ».....	95
Figure III.4. Echelle de performance de l'indicateur « EC »	99
Figure III.5. Echelle de performance de l'indicateur « Âge » et « Sexe »	100
Figure III.6. Echelle de performance de l'indicateur « NES ».....	101
Figure III.7. Echelle de performance de l'indicateur « TO » (logements F2 et F3).....	102
Figure III.8. Echelle de performance de l'indicateur « TO » (logements F4 et F5).....	102
Figure III.9. Echelle de performance de l'indicateur « ACB »	104

Figure III.10. Echelle de performance de l'indicateur « Amoy »	104
--	-----

Chapitre 04

Figure IV.1. Localisation du cas d'étude n°01 (Source : Google Earth)	113
Figure IV.2. Photos prises sur le site du premier cas d'étude	114
Figure IV.3. Localisation du cas d'étude n°02 (Source : Google Earth)	114
Figure IV.4. Photos prises sur le site du deuxième cas d'étude	115
Figure IV.5. Localisation du cas d'étude n°03 (Source : Google Earth)	116
Figure IV.6. Photos prises sur le site du deuxième cas d'étude	116
Figure IV.7. Evaluation des performances du cas d'étude n°01 (Bâtiment 8).....	136
Figure IV.8. Evaluation des performances du cas d'étude n°01 (Bâtiment 9).....	137
Figure IV.9. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 24).....	138
Figure IV.10. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 26).....	139
Figure IV.11. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 19).....	140
Figure IV.12. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 20).....	141
Figure IV.13. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 27).....	142
Figure IV.14. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 28).....	143
Figure IV.15. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment A).....	144
Figure IV.16. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment B)	145
Figure IV.17. Performances obtenues par critères (Cas d'étude n°01)	150
Figure IV.18. Performances obtenues par critères (Cas d'étude n°02)	151
Figure IV.19. Performances obtenues par critères (Cas d'étude n°03)	151
Figure IV.20. Performances obtenues par objectifs (Cas d'étude n°01)	152
Figure IV.21. Performances obtenues par objectifs (Cas d'étude n°02)	152
Figure IV.22. Performances obtenues par objectifs (Cas d'étude n°	153
Figure IV.23. Performances sismique des bâtiments des cas étudiés	154

Liste des tableaux

Chapitre 01

Tableau I.1. Historique de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments	13
Tableau I.2. Classification des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments	19
Tableau I.3. Les différentes échelles d'analyse et leur application.....	20
Tableau I.4. Synthèse des méthode d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments existantes	23
Tableau I.5. Méthodes multicritères d'aide à la décision.....	35

Chapitre 02

Tableau II.1. Historique d'inondations de l'Algérie 1927 à 2008	57
Tableau II.2. Séismes majeurs en Algérie de 419 à 2022	80
Tableau II.3. Séismes majeurs en Algérie de 419 à 2022 (Suite)	81

Chapitre 03

Tableau III.1. Tableau de bord de diagnostic de la vulnérabilité	88
Tableau III.2. Tableau de bord de diagnostic de la vulnérabilité (Suite)	89
Tableau III.3. Tableau de bord de diagnostic de la vulnérabilité (Suite)	89
Tableau III.4. Méthodes de calcul des IPs de l'objectif « vulnérabilité de sol »	90
Tableau III.5. Méthodes de calcul des IPs de l'objectif « vulnérabilité de sol » (Suite).....	90
Tableau III.6. Méthodes de calcul des IPs du critère « Conception architecturale »	91
Tableau III.7. Méthodes de calcul des IPs du critère « Conception architecturale » (Suite) ...	91
Tableau III.8. Méthodes de calcul des IPs du critère « Système de structurel ».....	92
Tableau III.9. Méthodes de calcul des IPs du critère « Système de structurel » (Suite).....	92
Tableau III.10. Méthode de calcul des IPs du critère « Etat de la structure ».....	93
Tableau III.11. Méthode de calcul des IPs de l'objectif « Vulnérabilité social »	93
Tableau III.12. Méthode de calcul des IPs de l'objectif « Vulnérabilité environnementale ».	94
Tableau III.13. Echelle de performance de l'indicateur (PT).....	95
Tableau III.14. Echelle de performance de l'indicateur « PCP ».....	95
Tableau III.15. Echelle de performance de l'indicateur « PE »	95
Tableau III.16. Echelle de performance de l'indicateur « PS »	96
Tableau III.17. Echelle de performance des IPs du critère « AgrChim »	96
Tableau III.18. Echelle de performance de l'indicateur « RP »	96
Tableau III.19. Echelle de performance de l'indicateur « EP »	96
Tableau III.20. Echelle de performance de l'indicateur « REL »	97
Tableau III.21. Echelle de performance de l'indicateur « ET »	97
Tableau III.22. Echelle de performance de l'indicateur « HB »	97

Tableau III.23. Echelle de performance de l'indicateur « PSR ».....	97
Tableau III.24. Echelle de performance de l'indicateur « SC » (Portique auto stable).....	97
Tableau III.25. Echelle de performance de l'indicateur « SC » (construction mixte)	98
Tableau III.26. Echelle de performance des indicateurs « PC/PEL »	98
Tableau III.27. Echelle de performance de l'indicateur « AC »	98
Tableau III.28. Echelle de performance de l'indicateur « CC ».....	98
Tableau III.29. Echelle de performance de l'indicateur « DC »	98
Tableau III.30. Echelle de performance de l'indicateur « BA »	99
Tableau III.31. Echelle de performance de l'indicateur « AB »	99
Tableau III.32. Echelle de performance de l'indicateur « DS ».....	99
Tableau III.33. Echelle de performance de l'indicateur « CNS »	100
Tableau III.34. Echelle de performance de l'indicateur « PR ».....	100
Tableau III.35. Questionnaire proposées à la population résidente du bâtiment	101
Tableau III.36. Echelle de performance de l'indicateur « MPH ».....	101
Tableau III.37. Echelle de performance des indicateurs « DH/DPC/DPP »	103
Tableau III.38. Echelle de performance de l'indicateur « ZL »	103
Tableau III.39. Echelle de performance de l'indicateur « ZS »	104
Tableau III.40. Echelle de performance de l'indicateur « CCU ».....	105
Tableau III.41. Echelle de performance de l'indicateur « EM ».....	105
Tableau III.42. Degré d'importance des indicateurs.....	108
Tableau III.43 . Valeurs de RI.....	110

Chapitre 04

Tableau IV.1. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01	117
Tableau IV.2. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)....	118
Tableau IV.3. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)....	119
Tableau IV.4. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)....	120
Tableau IV.5. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)....	120
Tableau IV.6. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)....	121
Tableau IV.7. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)....	122
Tableau IV.8. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)....	122
Tableau IV.9. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02.....	123
Tableau IV.10. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)..	123
Tableau IV.11. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)..	124
Tableau IV.12. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)..	124
Tableau IV.13. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)..	125
Tableau IV.14. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)..	125
Tableau IV.15. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)..	126
Tableau IV.16. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)..	127
Tableau IV.17. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)..	128
Tableau IV.18. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)..	129
Tableau IV.19. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°03.....	129
Tableau IV.20. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°03 (Suite)..	130

Tableau IV.21. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°03 (Suite)..	131
Tableau IV.22. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°03 (Suite)..	131
Tableau IV.23. Attribution des ordres des préférences entre les IPs.	132
Tableau IV.24. Synthèse des calculs des poids des IPs	133
Tableau IV.25. Synthèse des calculs des poids des IPs (Suite).....	134
Tableau IV.26. Synthèse des calculs des poids des critères	135
Tableau IV.27. Synthèse des calculs des poids des critères (Suite).....	135
Tableau IV.28. Synthèse des calculs des poids des objectifs.....	135

Nomenclature et abréviation

AB : Age de bâtiment

AC : Alignement des éléments verticaux de contreventement

ACB : Accessibilité au bâtiment

Accblt : Accessibilité

AgrChim : Agressivité chimique

AHP : Analytic hierarchy process

AMMO : Ammonium

Amoy : Valeurs moyennes d'accélération pour les séismes

BA : Bâtiment accolés avec joint insuffisant ou obstrué

CC : Continuité des éléments de contreventement en hauteur

CCU : Code de construction utilisé

CNS : Risque de chute des éléments non structuraux

ConcArch : Conception architecturale

DS : Forte différence de contreventement

DH : Distance aux hôpitaux

DPC : Distance aux postes de protection civile

DPP : Distance aux postes police

DS : Désordre structuraux constatés

EC : Etat général de conservation

EM : Eloignement par rapport à la mer

EMS : Echelle macrosismique européenne

EP : Elancement en plan

ET : Etage transparent

EtatStr : Etat de la structure

FE : Femmes enceintes

FEMA : Fédéral emergency management agency

FPE : Femmes avec plus de 5 enfants

HAZUS : Hazurd Us

HB : Hauteur de bâtiment

IPs : Indice de performance sismique

MAG : Magnésium

MMAD : Méthodes multicritères d'aide à la décision

MHP : Mobilité physique des occupants

MSP : Méthode de la somme pondérée

NES : Niveau d'éducation et de sensibilisation

ONS : Office national des statistiques

PA : Ration de la population âgée

PE : Proximité d'eau

PEL : Poteau élancé

PC : Poteau court

PCP : Proximité de changement de pente

PF : Ration de la population féminine

PH : Potentiel hydrogène

PR : Projet de réhabilitation pour les anciens bâtiments

PPS : Proximité de soutènement

PSR : Partie saillante ou rentrante

PT : Pente générale du terrain

QualVie : Qualité de vie

RE : Ration d'enfants

REL : Régularité en élévation

RP : Régularité en plan

SC : Système de contreventement

Secrsm : Secourisme

SS : Sol en surface

StabSol : Stabilité du sol

SULF : Sulfate

SysStr : Système structural

TO : Taux d'occupation de logement

TS : Type de site

VulnBâ : Vulnérabilité de bâtiment

VulnSoc : Vulnérabilité sociale

VulnSol : Vulnérabilité du sol

VulnStr : Vulnérabilité de la structure

VulnEnv : Vulnérabilité environnementale

ZL : Présente de zone libre

ZS : Zonage sismique

Résumé

L'Algérie est un pays à forte activité sismique. Au cours de la dernière décennie, de nombreux tremblements de terre destructeurs se sont produits, en particulier dans la partie nord, causant d'énormes pertes en vies humaines, en bâtiments et en équipements. Afin de réduire ce risque et d'éviter des graves dommages aux bâtiments existants, une étude de vulnérabilité sismique de cette catégorie de bâtiments a été envisagée.

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 trois cas d'étude réels dans la Wilaya de Bouira. Nous avons choisi deux cas dans la ville (ancien bâtiments 1988, AADL 2021), et un cas dans la région de Ait Laaziz. Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

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

Abstract

Algeria is a country with high seismic activity. During the last decade, many destructive earthquakes have occurred, especially in the northern part, causing huge losses in human lives, buildings and equipment. In order to reduce this risk and avoid serious damage to existing buildings, a seismic vulnerability study of this category of buildings was considered.

This study is 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 a descriptive diagnostic top-down approach that aims to build a dashboard grouping the various indicators of vulnerability assessment of a building. The second is a multi-criteria aggregation based on the weighted sum method and aims to calculate the performance of the vulnerability criteria and objectives. The calculation of the weights of the indicators will be done by the AHP method.

In order to demonstrate the developed methodology, we confront it with three real cases of study in the Wilaya of Bouira. We have chosen two cases in the city (old buildings 1988, AADL 2021), and one case in the region of Ait Laaziz. The results obtained are presented and discussed.

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

الملخص

الجزائر بلد به نشاط زلزالي مرتفع. خلال العقد الماضي، حدثت العديد من الزلازل المدمرة، خاصة في الجزء الشمالي، مما تسبب في خسائر فادحة في الأرواح والمباني والمعدات. من أجل تقليل هذا الخطر وتجنب حدوث الأضرار الجسيمة للمباني القائمة، تم النظر في دراسة الضعف الزلزالي لهذه الفئة من المباني.

هذه الدراسة هي مساهمة في وضع منهجية لتقييم هشاشة المباني السكنية في السياق الجزائري. تعتمد هذه المنهجية على نهجين تكمليين: النهج التنازلي والنهج التصاعدي. الأول هو نهج تشخيصي وصفي من أعلى إلى أسفل يهدف إلى بناء لوحة معلومات تجمع المؤشرات المختلفة لتقييم الضعف في المبنى. والثاني عبارة عن تجميع متعدد المعايير يعتمد على طريقة المجموع المرجح ويهدف إلى حساب أداء معايير وأهداف الضعف. سيتم حساب أوزان المؤشرات بطريقة AHP .

لتوضيح المنهجية المطورة نقوم بتطبيقها على ثلاث حالات دراسة حقيقية في ولاية البويرة. اخترنا حالتين في المدينة (عمارات قديمة 1988 ، 2021 AADL) وحالة في منطقة ايت العزيز. سيتم عرض النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها.

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

Introduction générale

Introduction générale

Les phénomènes naturels tels que les volcans, les inondations, les cyclones, les tsunamis et les séismes préoccupent de plus en plus les autorités et les organisations nationales, et internationales.

Parmi les phénomènes les plus dévastateurs sur la planète nous distinguons le séisme. L'impact des séismes majeurs conduits généralement vers des pertes économiques et humaines considérables. Plusieurs exemples peuvent être cités à l'échelle mondiale comme le séisme de Chili en 1960 et en 2015, Chelf en 1980, Kobe en 1995, Boumerdes en 2003, Sumatra en 2004, Tohoku en 2011, etc.

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

Afin de réduire les pertes économiques et humaines, plusieurs méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique ont été développées dans le monde. Parmi ces méthodes : la méthode RISK-UE, la méthode HAZUS, la méthode CETE Méditerranée, etc.

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 déficiente de l'aménagement du territoire, de la construction d'infrastructures et de services inadéquats et de la dégradation de l'environnement.

Cette situation, d'exposition est accentuée par la précarité du par bâti de l'Algérie et du surpeuplement des villes de la région nord du pays. Cela nous conduit à conclure que l'intérêt de développée une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments d'habitation adaptée au contexte nationale est démontré.

Objectif et problématique de la recherche

L'objectif principal de notre étude, dans sa première patrie, 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.

Néanmoins, pour atteindre cet objectif tracé, une série de défis et de problématiques est à surmontée :

- 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 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

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

- **Le premier chapitre**, présente une recherche bibliographique qui développe les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants. Ainsi que les notions sur les méthodes multicritères d'aide à la décision.
- **Le deuxième chapitre**, donne un aperçu détaillé de la situation algérienne dans la lumière de cette notion de vulnérabilité des territoires face aux séismes.
- **Le troisième chapitre**, est dédié à la présentation de la méthodologie que nous proposons pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation dans le contexte algérien.
- **Le dernier chapitre**, est une validation de la méthodologie développée ainsi que de la base de données collectée sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans la région de Bouira. Les résultats obtenus seront présentés puis discuter et des conclusions sont tirées.

Chapitre 01

Vulnérabilité des bâtiments d'habitation – Bibliographie

I.1 Introduction

Le séisme ou tremblement de terre constitue un phénomène géologique qui de tout temps a terrorisé les populations qui vivent dans certaines zones du globe, c'est le risque naturel majeur le plus meurtrier qui cause le plus de dégâts.

Evaluer ce risque et le connaître est nécessaire pour toutes politiques de planification. Les bâtiments en sont un pilier incontournable. Estimer et effectuer des études de vulnérabilité du bâtiment existant permet de protéger progressivement toutes les constructions.

Différents travaux de recherche ont permis de développer des outils d'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures existantes (bâtiments, ponts, infrastructures souterraines, etc.).

Dans ce premier chapitre, nous essayerons de faire une synthèse, aussi riche possible, de la vulnérabilité des bâtiments aux séismes. Nous présenterons aussi les différentes méthodes de son évaluation.

I.2 Vulnérabilité – contexte générale

I.2.1 Définitions

A. Selon la littérature

La vulnérabilité décrit le caractère de quelque chose de fragile, de vulnérable ou en encore de sensible. Il peut s'agir plus généralement d'une faiblesse ([Dictionnaire français, 2021](#)).

B. Selon la sociologie

La notion de la vulnérabilité et aussi beaucoup utilisée dans le secteur de la gérontologie et de la gériatrie, souvent en complément à celle, typiquement biomédicale, de fragilité (frailty). ([Claude, 2019](#)).

C. Selon l'ingénierie civile

La vulnérabilité d'un élément est définie comme étant le degré de perte qu'il subit lors d'une catastrophe naturelle. Sa nature et son estimation varient selon que cet élément représente une population, des structures sociales, des structures physiques ou des actifs économiques.

La vulnérabilité se définit comme l'incapacité à résister à un aléa, et la vulnérabilité sismique est la probabilité de dommages aux bâtiments, services, infrastructures, etc., dus à tremblements de terre (Khan, 2019).

I.2.2 Types de vulnérabilité

S'il est désormais admis que le risque naît de la conjonction d'une menace (l'aléa), et d'enjeux plus ou moins vulnérables, la prise en compte des vulnérabilités comme composante fondamentale du risque au même titre que l'aléa tarde à entrer dans les mœurs. En effet le risque a été longtemps étudié sous l'angle de l'aléa.

I.2.2.1 Vulnérabilité institutionnelle

La vulnérabilité institutionnelle est liée directement à la vulnérabilité humaine en matière de la capacité de réponse des institutions face à la crise (Leone et Vinetl, 2004).

I.2.2.2 Vulnérabilité environnementale

Elle concerne majoritairement l'analyse des dommages sur les ressources environnementales (végétation, les cultures, les sols et la faune), provoqués par les catastrophes naturelles. Ces approches restent pour l'essentiel qualitatives, avec une simple description de dommages (Leone et Vinetl, 2004).

I.2.2.3 Vulnérabilité humaine

Elle est essentiellement traitée sous la forme de retour d'expérience sur les réponses, les adaptations, les comportements face aux événements dommageables et leurs conséquences socio-économique et territoriales. L'évaluation des risques consiste à diagnostiquer la vulnérabilité humaine en étudiant la qualité de la perception des menaces, les connaissances des moyens de protection et les types de comportement potentielle (Leone et Vinetl, 2004).

I.2.3 Historique et domaine d'application

Le terme « vulnérabilité », largement utilisé depuis les années 1970, renvoie à des cadres théoriques différents selon la culture académique, la discipline et la langue (Thomas, 2008). D'abord utilisé dans le cadre d'études liées aux aléas naturels, principalement américaines, il a au fil du temps, été adopté ou discuté dans de nombreuses autres dimensions des sciences sociales à travers le monde (Becerra, 2012). Il y a aujourd'hui un « trop plein sémantique » puisqu'il évoque aussi bien la « pauvreté », la « précarité », la « dépendance »,

la « fragilité », l'« insécurité », « l'incertitude » ou « l'absence de régulation » que la « victimisation », ou simplement le « risque ». L'appréhension de la vulnérabilité émane de disciplines variées : anthropologie, démographie, économie, sociologie, etc.

L'usage du mot « vulnérabilité » est ainsi caractérisé par sa transversalité tant d'un point de vue disciplinaire que thématique. C'est une notion plurielle (Brodriez-Dolino, 2016). Dans certains cas, il est utilisé pour l'ensemble d'une population ou d'un groupe social. C'est le cas de la population de certains territoires, considérée dans son ensemble vulnérable, du fait de son exposition à certains risques environnementaux (Adjamagbo, 2020).

I.2.4 Facteurs de la vulnérabilité

Le but de l'analyse de vulnérabilité territoriale vise à identifier, caractériser, hiérarchiser les espaces à partir desquels se crée et se diffuse la vulnérabilité au sein d'un territoire (Golossof, 1999).

L'analyse de la vulnérabilité suppose une réflexion propre à chaque enjeu. L'analyse des facteurs de vulnérabilité a donné lieu à différentes méthodes proposant des solutions pour réduire le risque et améliorer les réponses des organisations face à la crise.

I.2.4.1 Vulnérabilité et capacité de résistance

Le degré de perte dépend des caractéristiques internes des enjeux, il existe des seuils de fragilité au-delà desquels, un enjeu subit des dommages. On ne parle ici que d'enjeux matériels, les pertes humaines étant vue comme la conséquence de la défaillance de ces derniers. Ainsi envisagée, la vulnérabilité devient la capacité de résistance physique de l'enjeu matériel (Golossof, 1999).

I.2.4.2 Vulnérabilité et résilience

La résilience, mesure la capacité de tout ou partie du système à absorber et à se relever de l'occurrence d'un aléa. La résilience est vue comme un antonyme de la vulnérabilité.

Il s'agit de la capacité des communautés humaines à supporter les chocs ou les perturbations externes qui affectent leur infrastructure, tels que la vulnérabilité environnementale ou sociale, etc., et de se relever de telles perturbations. Dans ces conditions, la résilience est un facteur de durabilité (Golossof, 1999).

I.2.4.3 Vulnérabilité et capacité d’adaptation

La capacité d’adaptation des sociétés à l’aléa explique leur capacité à faire face à la crise. Cette capacité d’adaptation varie en fonction des facteurs sociaux et des représentations qui déterminent la capacité d’anticipation, la rapidité de réaction et l’efficacité de la réponse.

Les catastrophes marquent l’interface entre un phénomène physique extrême et une population humaine vulnérable. On peut affirmer que la probabilité d’occurrence du phénomène physique extrême est constatée. Si cette probabilité est constante, la seule explication logique à l’augmentation des catastrophes doit être recherchée dans la vulnérabilité croissante des populations au phénomène physique extrême (Leroy, 1992).

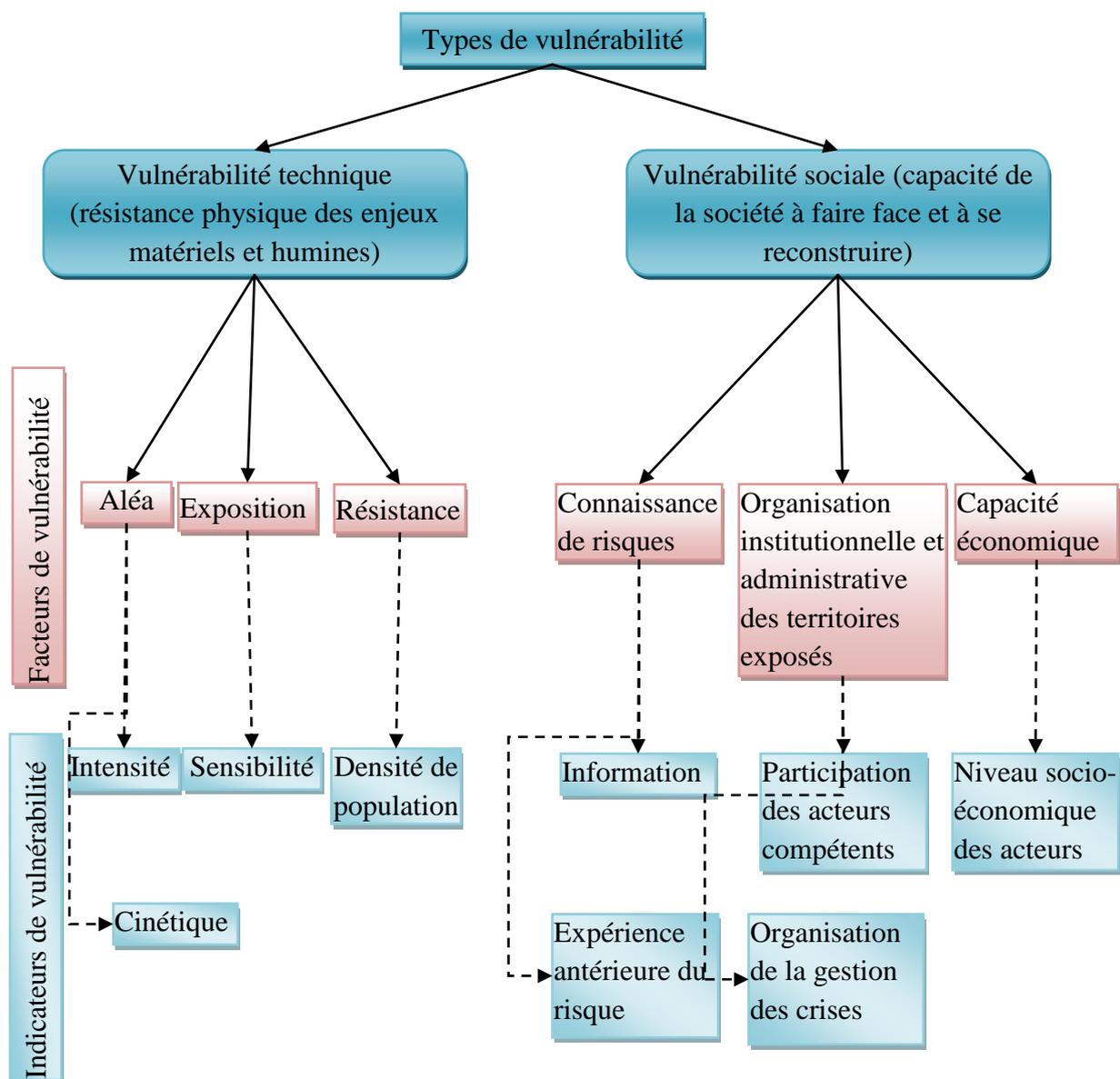


Figure I.1. Organigramme de classification des différents facteurs et indicateurs de vulnérabilité.

I.2.5 Cartographie des aléas et de la vulnérabilité

La carte est un outil indispensable à la gestion des risques et des crises, parce qu'elle permet de le matérialiser, de rendre visible l'invisible. L'approche de la vulnérabilité, répond aux besoins de la gestion et de l'aide à la décision en alternant entre vision globale et analytique, mais cette approche conduit à des synthèses qui lui font parfois perdre en précision (Figure I.2).

La prise en compte simultanée de tous les aléas est efficace en termes de gestion, pour saisir les interactions possibles, mais la multiplication des informations rend leur superposition cartographique difficile. L'efficacité de la mise en carte dans l'approche fonctionnelle se fait au détriment de la prise en compte des jeux d'acteurs et des comportements en cas de crise.

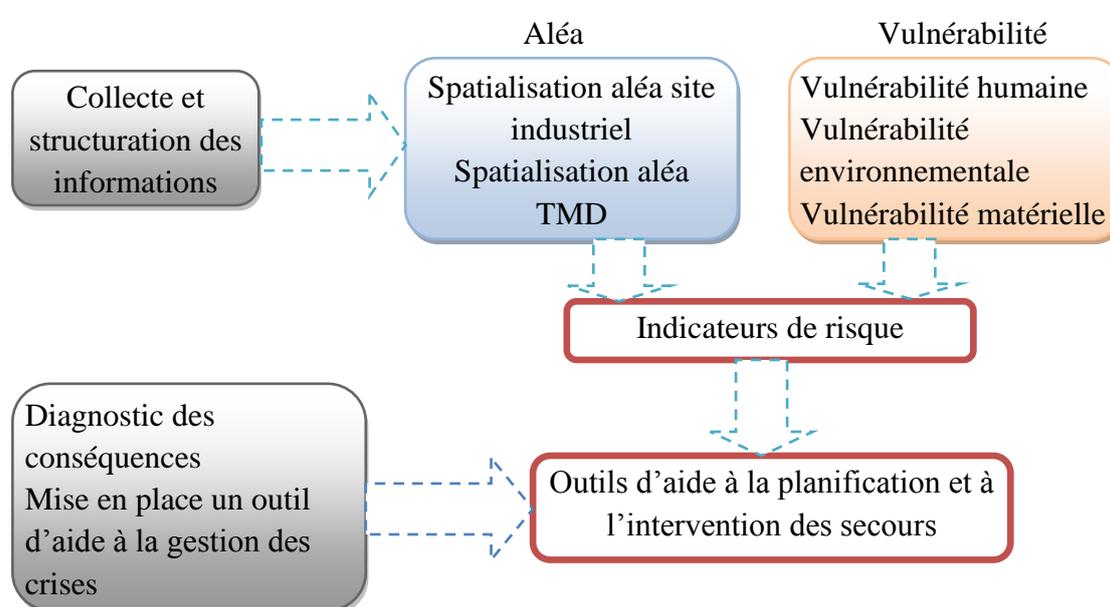


Figure I.2. Représentation de l'approche de la vulnérabilité (Golossov, 1999)

I.3 La vulnérabilité dans domaine de la construction

Analyser le risque sismique pour les bâtiments et infrastructures stratégiques à l'échelle territoriale ou urbain représente un élément fondamental dans l'atténuation efficace des pertes économiques et humaines dues aux tremblements de terre.

I.3.1 Définition du risque

Le [Petit Robert \(2021\)](#) définit le risque comme étant «un danger éventuel plus ou moins prévisible». Il prend en compte à la fois, la probabilité d'occurrence de tels événements et l'importance de leurs conséquences. Le risque est relié à la possible réalisation d'évènements

non désirés. Les différents paramètres constitutifs du risque sont l'aléa, la vulnérabilité et les valeurs exposées au risque considéré.

I.3.1.1 Composants du risque

Le risque R est par définition la réunion d'un aléa A, d'une vulnérabilité V à cet aléa et de la valeur de l'élément exposé E :

$$R = A \times V \times E$$

Les définitions données lors de la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (DIPCN, 1992) sont :

- **Risque** : Espérance mathématique de pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens et atteinte à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée, pour un aléa particulier.
- **Aléa** : Événement menaçant ou probabilité d'occurrence dans une région et au cours d'une période donnée, d'un phénomène pouvant engendrer des dommages.
- **Éléments exposés ou éléments à risque** : Population, constructions et ouvrages de génie civil, activités économiques, services et infrastructures publiques, etc., exposés à un aléa. Un élément exposé ayant une valeur constitue un enjeu.
- **Vulnérabilité** : Degré de perte d'un élément à risque résultant d'un phénomène susceptible d'engendrer des victimes et des dommages matériels.

I.3.1.2 Types de risques

Les différents types de risques encourus par la société et menaçant l'environnement peuvent être regroupés en cinq grandes familles à savoir : les risques naturels, technologiques, de transports collectifs, de la vie quotidienne et les risques liés aux conflits (Dif, 2020).

Seules les trois premières catégories font partie de ce qu'on appelle le risque majeur, qui est la possibilité d'un événement d'origine naturelle ou anthropique, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes et occasionner des dommages importants dépassant les capacités des sociétés. L'existence d'un risque majeur est liée d'une part à la présence d'un aléa important, et d'autre part à l'existence de grands enjeux très vulnérables. Un risque majeur est souvent caractérisé par sa faible fréquence et par son énorme gravité.

I.3.1.3 Composantes du risque sismique

Le risque sismique est l'un des risques naturels les plus répandus sur la planète. Il peut être exprimé par la convolution de l'aléa sismique, de la vulnérabilité du bâti, et des pertes matérielles et humaines. Il s'exprime généralement en termes économique et social selon différents scénarios de séismes considérés. Le risque sismique se caractérise par trois composantes (Dif, 2020) :

- **L'aléa sismique** : qui est la probabilité pour un lieu géographique donné d'occurrence d'un événement sismique de caractéristiques données (intensité, magnitude, profondeur focale en particulier).
- **La vulnérabilité du bâti**: qui caractérise la fragilité d'un élément exposé au phénomène naturel et s'exprime par une relation entre des niveaux de dommages et des niveaux d'agression sismique (courbe de vulnérabilité). La vulnérabilité peut être de type structurel (qui dépend des caractéristiques physiques et géométriques des bâtiments), humaine, fonctionnelle, économique ou sociale. La vulnérabilité est généralement assimilée à la résistance à l'endommagement d'un type d'enjeux (population, bâtiments...) par rapport à la manifestation d'un phénomène naturel d'une intensité donnée.
- **Les enjeux** : qui représentent la valeur attribuée aux éléments exposés, qui rassemblent des bâtiments et leurs occupants et contenus ainsi que les activités économiques qu'ils abritent, les infrastructures de transport et d'énergie, les structures vitales et les patrimoines susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel.

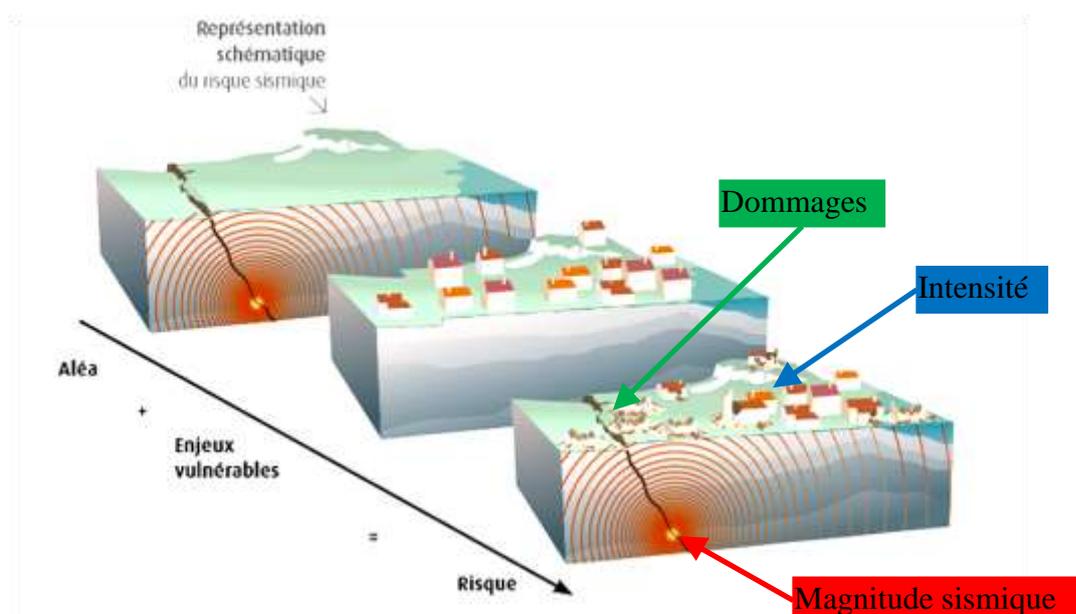


Figure I.3. Représentation schématique du risque sismique

I.3.2 Historique de l'étude de la vulnérabilité sismique des bâtiments

La définition de la vulnérabilité sismique des bâtiments à l'échelle urbaine est un élément fondamental composant le modèle de pertes lors de survenance d'un tel sinistre. De nombreuses recherches ont été menées au cours des 30 dernières années dans ce domaine (Calvi et al. (2006)).

Les premières prédictions de vulnérabilité structurelle à grande échelle géographique étaient basées sur les dommages observés lors des tremblements de terre formant de matrices de probabilité de dommages. Les matrices de probabilité de dommages expriment, de façon discrète la forme, la probabilité conditionnelle d'obtenir un niveau de dommage j , dû à un mouvement du sol d'intensité i , $P[D = j/i]$. Les fonctions de vulnérabilité, qui sont des fonctions continues exprimant la probabilité de dépasser un état de dommage donné en fonction de l'intensité du séisme, ont été proposées plus tard, mais étaient toujours basés initialement sur les dommages observés lors des tremblements de terre.

Il y a de nombreux avantages à utiliser les données observées pour étudier la vulnérabilité de l'existant parc immobilier, dont le principal avantage à l'heure actuelle est la possibilité d'utiliser ces données pour calibrer ou tenter de valider les courbes de vulnérabilité dérivées analytiquement (Colombi et al., 2008).

Le Tableau I.1 présente un historique de la littérature consulté de l'évolution des études de vulnérabilité aux séismes des bâtiments.

Tableau I.1. Historique de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments

Auteur	Année	Contexte de l'étude
Whitman et al.	1973	Développement des premières matrices de dommages qui sont basées sur les dommages observés sur différentes typologies structurelles (séisme de San Fernando 1971)
Bagara et al.	1982	Production de version européennes d'une matrice de probabilité de dommage qui est basée sur les données de dommages des bâtiments italiens (séisme d'Irpinia 1980)
Spence et al.	1992	Comme l'intensité macrosismique n'est pas une variable continue, Spence et al. ont résolu ce problème grâce à l'utilisation de leur échelle d'intensité sans paramètre (PSI) pour dériver les fonctions de vulnérabilité basées sur les dommages observés des bâtiments en utilisant les dommages MSK escalader
Grüntal	1998	Créer l'échelle EMS98 (échelle macrosismique européenne)
Sabetta et al.	1998	Ont utilisé des relevés post-séisme d'environ 50 000 bâtiments endommagés par des tremblements de terre italiens destructeurs afin d'en déduire des courbes de vulnérabilité
Orsini	1999	A utilisé le paramètre de mouvement du sol PSI pour dériver les courbes de vulnérabilité pour les appartements en Italie
Dolace et al.	2003	Ont adapté les matrices originales en ajoutant une classe de vulnérabilité D, en utilisant l'EMS98 échelle (Grünthal 1998), pour rendre compte des bâtiments qui ont été construits depuis 1980, qui devraient avoir une vulnérabilité plus faible car ils auraient été soit modernisés, soit conçus aux codes de conception parasismiques récents
Pasquale et al.	2005	Ont changé le DPM de l'échelle d'intensité MS à l'échelle MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) car la sismique italienne catalogue est principalement basée sur cette intensité et le nombre de bâtiments a été remplacé par le nombre de logements afin que les matrices puissent être utilisées en conjonction avec le 1991 Données du recensement, collectées par l'ISTAT (Institut national italien des statistiques).
Rota et al.	2006	Ont également utilisé les enquêtes sur les dommages post-séisme d'environ 90 000 bâtiments en Italie afin de dériver des courbes de fragilité typologiques pour des classes de construction typiques (par exemple bâtiments en béton armé antisismiques de 1 à 3 étages).

I.3.3 Facteurs affectant la vulnérabilité sismique des bâtiments

En dehors du type de construction, différents facteurs influent sur le niveau global de vulnérabilité d'une structure. Ces facteurs s'appliquent de manière générale à tous les types de

structures, qu'elles soient calculées ou non, de même que les structures avec ou sans conception parasismique (Kassoul, 2016).

I.3.3.1 Qualité d'exécution

Il va de soi qu'un bâtiment bien construit sera plus résistant qu'un bâtiment mal construit, mais ce point n'avait pas été pris auparavant en considération dans les échelles d'intensité, sans doute en partie parce qu'il est difficile de définir les éléments qui constituent ce "bien" et ce "mal". L'utilisation de matériaux de bonne qualité et de bonnes techniques de construction conduira à un bâtiment bien plus apte à résister à la vibration qu'un bâtiment mal construit à l'aide de matériaux médiocres.

Dans le cas des matériaux, la qualité du mortier est particulièrement importante et même une maçonnerie de moellons bruts peut fournir un bâtiment de solidité raisonnable si le mortier est de haute qualité. Une mauvaise technique peut signifier à la fois des négligences et des mesures de réduction des coûts, comme le défaut d'assemblage correct entre les différentes parties de la structure. Dans le cas de structures bien calculées et mal construites, il se peut que la structure finie ne réponde pas réellement aux dispositions appropriées du code de construction parasismique.

I.3.3.2 Etat d'entretien

Un bâtiment qui a fait l'objet d'un entretien correct se comportera conformément à la résistance attendue du fait des autres facteurs. Un bâtiment que l'on a laissé se dégrader pourrait être significativement moins résistant, au point de diminuer d'une unité sa classe de vulnérabilité. C'est ce que l'on observe dans le cas de bâtiments abandonnés ou délaissés ainsi que dans les cas présentant un manque évident d'entretien.

Un cas tout particulier à mentionner est celui des bâtiments déjà endommagés (le plus souvent par un séisme précédent lorsqu'il s'agit d'une série de secousses). Ces bâtiments peuvent se comporter de manière extrêmement médiocre de telle sorte qu'une réplique relativement faible peut provoquer une quantité de dégâts disproportionnée (notamment un effondrement) sur des bâtiments endommagés par la secousse principale.

I.3.3.3 Régularité

Concernant la résistance au séisme, le bâtiment idéal serait un cube dans lequel toutes les variations internes de rigidité (comme les cages d'escalier) seraient disposées de manière

symétrique. Comme de tels bâtiments seraient incommodes des points de vue fonctionnels et déplorable du point de vue esthétique, on peut s'attendre à des variations plus ou moins importantes par rapport à ce plan idéal de la plupart des bâtiments que l'on peut rencontrer.

Plus on s'éloigne de la régularité ou de la symétrie, plus grande est la vulnérabilité du bâtiment à la secousse sismique, et il est souvent possible d'observer sur des bâtiments endommagés la manière dont les irrégularités ont clairement contribué aux dégâts (par exemple lors de l'effondrement d'étages transparents).

I.3.3.4 Ductilité

La ductilité est une mesure de la capacité d'un bâtiment à résister à des charges latérales dans un domaine post-élastique, c'est-à-dire en dissipant l'énergie du séisme et en créant des dégâts de manière contrôlée, largement répartie ou concentrée localement, selon le type de construction et de système structural. La ductilité peut être directement fonction du type de construction: les ossatures en charpente métallique bien construite présente une ductilité élevée et résiste donc bien à la secousse par rapport à des bâtiments de ductilité plus faible comme les maisons de briques. Dans les bâtiments conçus parasismiques, les paramètres du bâtiment déterminant ses caractéristiques dynamiques (rigidité et distribution des masses) sont maîtrisés et la qualité de la transformation et de la dissipation de l'énergie doit être assurée par l'interaction sol-structure, les fondations et les éléments structuraux, et en évitant les concentrations locales de dégradations.

I.3.3.5 Position

La position d'un bâtiment par rapport aux autres bâtiments de son voisinage peut avoir un effet sur son comportement au cours d'un tremblement de terre. Dans le cas des rangées de maisons d'un lotissement en ville, ce sont souvent les maisons situées à l'extrémité d'une rangée ou dans une position d'angle qui sont les plus gravement affectées. Un côté de la maison ancré à la voisine tandis que l'autre côté ne l'est pas, entraîne une irrégularité de la rigidité globale de la structure qui a tendance à aggraver les dégâts. Des dégâts sévères peuvent se produire lorsque deux grands immeubles ayant des périodes propres distinctes sont situés trop près l'un de l'autre. Au cours d'un séisme, ils peuvent osciller à des fréquences différentes et se heurter, causant un effet de pilonnage. Ces dégâts ne sont pas une mesure de la violence de la secousse sismique et doivent être écartés lors de l'attribution d'une intensité.

I.3.3.6 Renforcement

Lorsque qu'une réhabilitation est envisagée pour modifier des bâtiments afin d'assurer un bon comportement à l'action sismique, il en résulte de nouveaux types de bâtiments «composites». Leurs performances peuvent être radicalement différentes de celles d'un bâtiment de base non modifié. Par exemple, si l'on prend des constructions anciennes en pierre tout venant et que l'on améliore les éléments horizontaux en remplaçant les planchers ou en insérant des éléments de liaisons, la performance peut être améliorée jusqu'à la classe B. Si en outre, on applique des injections de mortier ou d'époxy ou un chemisage de béton armé, les performances peuvent être améliorées et atteindre les classes attribuées aux bâtiments ayant une conception parasismique.

I.3.3.7 Conception parasismique

Il est impossible, pour les besoins d'une échelle macrosismique, de donner une classification complète des bâtiments calculés qui reflète les différences et les subtilités des codes parasismiques nationaux. Des corrélations entre les niveaux de résistance aux séismes selon les codes parasismiques en vigueur en Europe ou dans d'autres pays et les classes de vulnérabilité typiques mentionnées doivent être mise au point et elles exigent une discussion entre les spécialistes nationaux. Les fonctions de vulnérabilité pour les différents types de structures doivent être évaluées pour les structures calculées en fonction principalement du niveau de conception parasismique prévu (cohérent avec la réglementation).

I.4 Vulnérabilité des bâtiments d'habitation

I.4.1 Intérêt de l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments

Tous les peuples du monde vivent dans des bâtiments et puisque les tremblements de terre représentent un danger soit pour les bâtiments soit pour la vie des habitants, l'évaluation et la réduction de ce danger est devenue une question importante.

L'évaluation de la vulnérabilité des constructions existantes est un élément clé qui permet de mieux évaluer les pertes et de réduire les conséquences économiques consécutives aux tremblements de terre. L'étude de la vulnérabilité sismique consiste, à partir d'un mouvement sismique donné, à déterminer les bâtiments et les structures les plus vulnérables vis-à-vis du séisme au niveau d'une région, d'une ville, d'un grand nombre de bâtiments ou d'une structure,

donc une étude de vulnérabilité sismique est le premier pas vers la détermination des bâtiments nécessitant des confortements éventuels.

I.4.2 Classification des méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments

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.

Plusieurs classifications ont été proposées dans la littérature pour décrire les nombreuses méthodes utilisées jusqu'à présent pour évaluer la vulnérabilité sismique. Ainsi, 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 bâtiments (Augusti et Ciampoli, 2000).

Chacune de ces classifications a ses avantages. La première, basée sur le temps et la difficulté de calcul permet de bien illustrer que les méthodes d'analyses détaillées sont peu appropriées pour l'évaluation d'un ensemble de bâtiments. Par contre cette classification illustre moins bien le positionnement de certaines méthodes dites hybrides qui utilisent, par exemple, un système de pointage et les observations de la vulnérabilité.

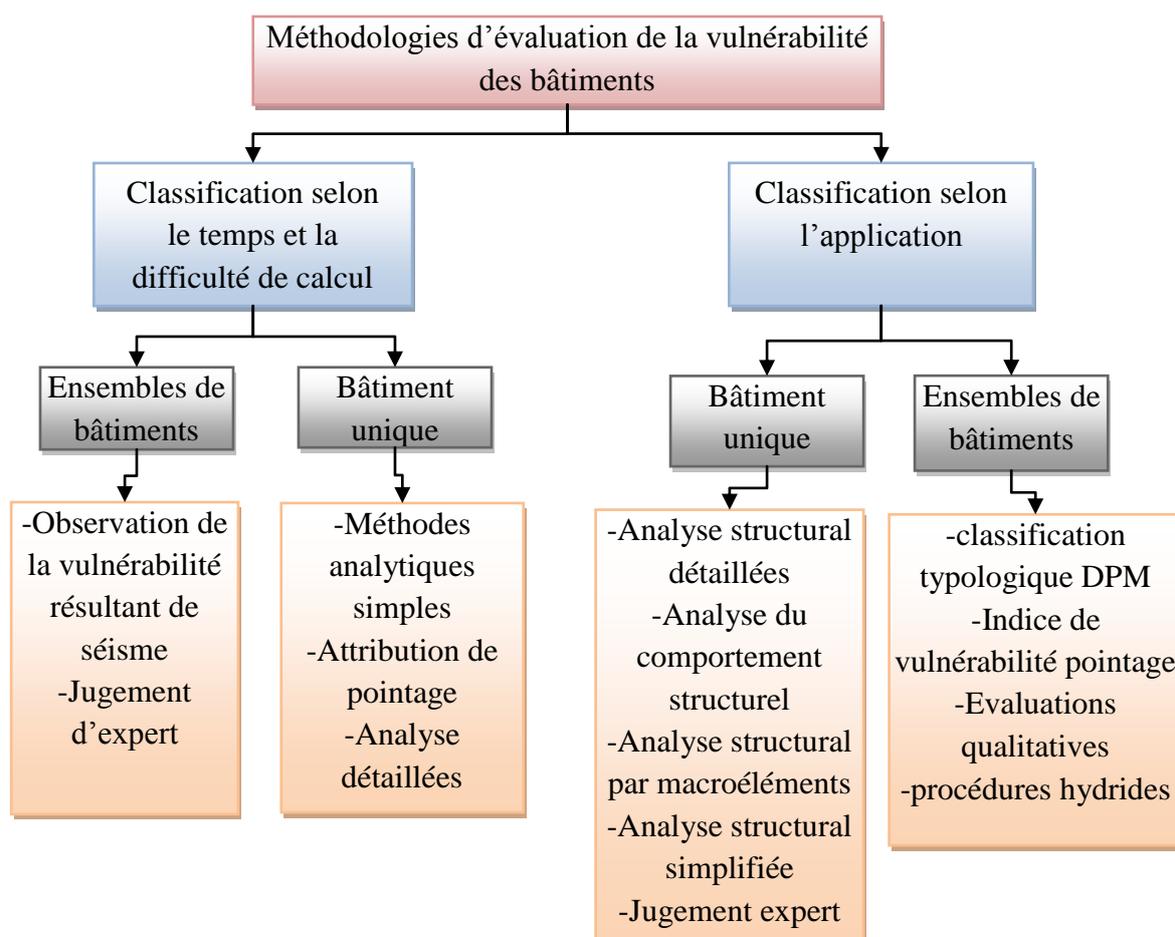


Figure I.4. Organigramme conceptuelle des méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments

Ces méthodes peuvent être divisées en deux catégories, qui sont plus ou moins liées à l'échelle de l'espace considérée pour l'analyse (par exemple, niveau urbain ou niveau du bâtiment, etc.). A grande échelle, les approches fondées sur des méthodologies empiriques consistant à l'évaluer la vulnérabilité à partir d'observations de la répartition statistique des dommages causés par des séismes antérieurs ou par le jugement d'experts.

Au contraire, à l'échelle locale, l'évaluation de la vulnérabilité est effectuée sur une base mécanique en prenant en compte les caractéristiques structurelles individuelles, ainsi que les caractéristiques locales du sol, et en utilisant des analyses numériques détaillées (Amellal, 2018).

Les Tableaux I.2 et I.3ci-dessous fait synthèse du positionnement des différentes méthodes et reflète la plus parts des approches qui concernent la vulnérabilité sismique des bâtiments. Ces dernières peuvent être classées suivant leur échelle d'analyse ou suivant l'approches de l'analyse.

Tableau I.2. Classification des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments

	Observation de la vulnérabilité résultant de séisme	Jugement expert	Modèles analytique simples	Attribution de pointage	Analyse détaillées
Description	DPM élaborées à partir des statistiques des séismes passés Fonction de vulnérabilité pour Différents types de bâtiments.	DPM développées en se basant sur le jugement d'experts de plusieurs classes de bâtiments.	Modèles simples servant à identifier les mécanismes de ruptures potentiels et le degré de dommages résultant.	Attribution de cotes aux bâtiments dans le but de les classer dans un inventaire	Procédure statique linéaire Dynamique linéaire Statique non linéaire Dynamique non linéaire.
Application	Ensemble de bâtiments Valide pour une région étudiée ou une similaire Ne considère pas les travaux de mise en conformité.	Ensemble de bâtiments difficilement applicable pour d'autres régions ou d'autres types de structures Méthode subjective comportant des incertitudes sur l'estimation des dommages et sur l'opinion formulée.	Bâtiments unique ou bâtiments ayant des caractéristiques communes Les résultats consistent en des intervalles de valeurs	Un ensemble de bâtiments ou bâtiments unique Détermine la nécessité d'une analyse détaillée Considère les travaux de mise en conformité sismique	Un seul bâtiment, phase il après la méthode de pointage
Références	Whitman, Reed et al 1971 Coburn & Spence 1992	ATC-13 1985 HAZUS 1997, 1999	Portugal : Ayala et al.,1997 Italie : Faccioli et al.,1999 Ciampoli,2000 Augusti et al., 2001 et 2002	Canada : manuel de sélection 1993 E.U : FEMA 154-155 1998,2002	FEMA-178, CNRC 1992 FEMA-310 ,1998 ASCE31_03, 2003 FEMA-273, 1997 FEMA-356 ,2000
Méthodes hybrides	Hung 2003 : FEMA-178 et système d'inférence floue (basé sur le jugement d'experts) Pour tenir compte des incertitudes. Résultant : INDEX DE PERFORMANSE				
	Fisher, Alvarez et al 2002 :Macro-éléments inélastiques avec le logiciel HAZUS pour un nombre limité d'édifices.			Kanda, Iwasaki et al 1997 : analyses statique non linéaires avec l'intégration de notions de fiabilité pour le calcul d'un index de performance	
	EMS(1992,1998) : fonction de vulnérabilité basée sur les vulnérabilités observées et sur le jugement d'experts				
	Lang2002 : Approche analytique avec procédure statique non linéaire. Résultat courbes de capacités reliées à EMS-98et fonction de vulnérabilité				
McCormack&Rad 1997 : estimation des pertes à partir de la procédure FEMA 154-155 en utilisant les DPM de PATC-13					

Tableau I.3. Les différentes échelles d’analyse et leur application.

	Augmentation des moyennes de mise en œuvre Temps et difficulté de calcul →				
Echelle d’analyse	Centaines de bâtiments		Quelques bâtiments	Bâtiments individuels	
Méthodes	Vulnérabilité : -Hazard -Radius -EMS98 -RISK-EU	-Indice de vulnérabilité	-Avis d’experts -ATC13	-Calculs analytiques simples -GNDT 1	-Analyse numérique -Modélisation -Push over -calculé par accel
Application	Ville – commune- quartier- parcs immobiliers - bâtiments stratégiques				
Moyen humaine	Sans formation - étudiant - techniciens - ingénieur - ingénieur confirmé				

Ces méthodes peuvent être aussi divisées en deux catégories. A grande échelle, des approches basées sur des méthodologies empiriques consistant à évaluer la vulnérabilité à partir des observations de dommages statistiques, les distributions dues à des tremblements de terre ou à un jugement d’expert sont généralement préférées. Mais à l’échelle locale, l’évaluation de la vulnérabilité est effectuée sur une base mécanique en tenant compte des caractéristiques structurales individuelles, ainsi que de caractéristiques locale de sol, et en utilisant des analyses numériques détaillées (Figure I.5).

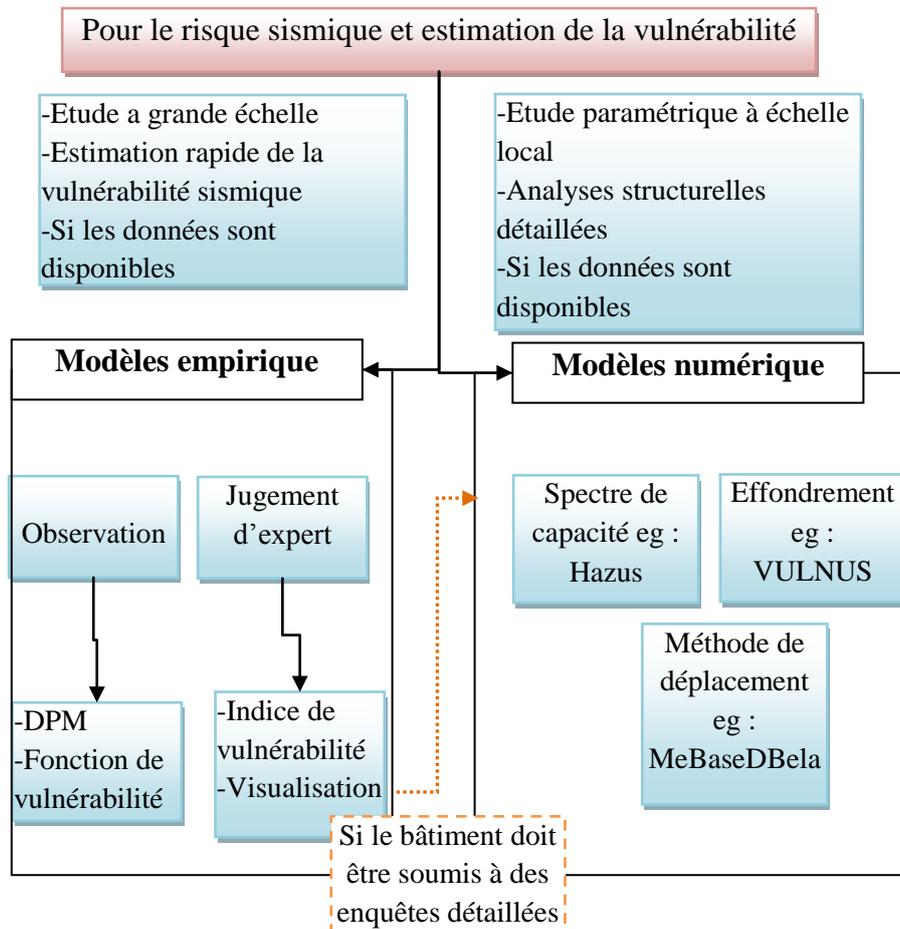


Figure I.5. Schématisation des modèles d’évaluation de la vulnérabilité et des risques sismiques

La méthode utilisée pour évaluer la vulnérabilité peut varier selon les dangers et dépend de la qualité et de la quantité des données disponibles. Pour évaluer la vulnérabilité à grande échelle, il est courant d'établir des typologies d'éléments exposés et d'évaluer la vulnérabilité d'un élément représentatif exposé à l'agression externe comme le premier pas.

La deuxième étape consiste à attribuer un indicateur de vulnérabilité (tel qu'un indice de vulnérabilité ou une fonction de fragilité) à l'ensemble des éléments, de manière uniforme ou aléatoire, afin d'obtenir des informations sur les zones urbaines dans leur ensemble. La figure I.6 montre la procédure d'une étude de vulnérabilité.

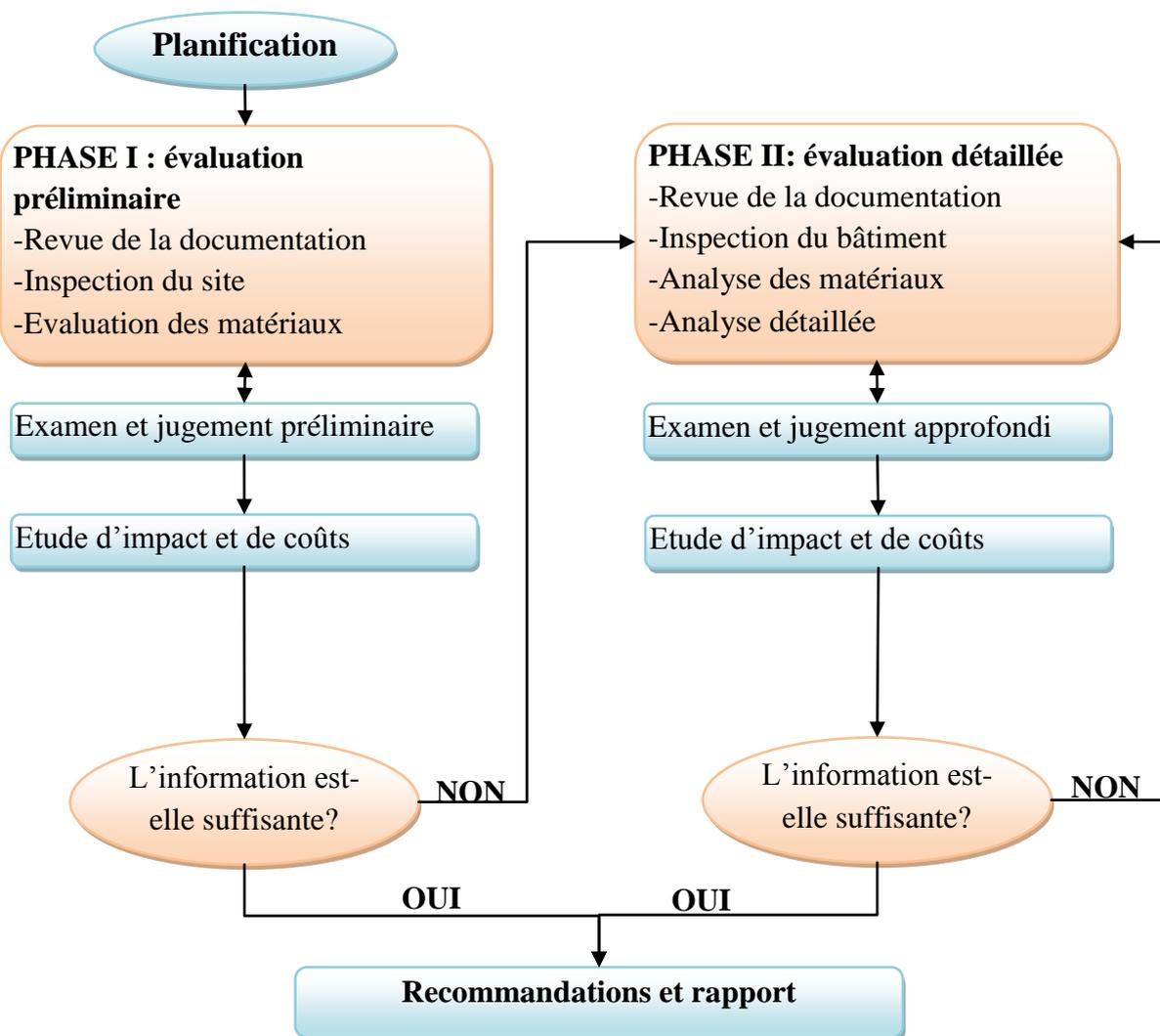


Figure I.6. Procédure d'évaluation structurale (ASCE)

Les méthodes sont nombreuses, elles sont fonction du système constructif, de l'usage ... etc. Il y a plusieurs sources méthodologies et outils d'évaluation dans la littérature pour différente

classe de structure qui se basent sur l'observation des séismes passés et sur l'estimation théorique et expérimentale du cadre bâti.

Dans le Tableau I.4, nous résumons l'essentiel des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments existantes.

Tableau I.4. Synthèse des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments existantes

	Méthode	Organisme /Année	Objectif	Avantages	Inconvénients	Références
Méthode empirique	FEMA154 (Fédéral Emergency Management Agency)	Américain 1988	Etablir des procédures simples permettant tant aux spécialistes qu'aux non-initiés d'identifier le risque dans les bâtiments à partir d'une inspection visuelle.	une méthode rapide d'évaluation de sécurité sismique des bâtiments.	- Il s'agit d'une cote donnant la classification du risque sismique associé au bâtiment sans considération de la valeur des pertes économiques ou humaines.	(Verrhiest, 2008)
	EMS 98 (European Macrosismic Scale)	Européenne 1998	La définition de l'échelle d'intensité macrosismique Européenne EMS98, permet d'estimer les dommages observés sur différents types de structures. Cette méthode utilise l'intensité comme donnée d'entrée du séisme. Elle est définie à l'origine pour caractériser les régions autour des épicentres des séismes en fonction des effets sur les constructions, les objets et les personnes.	L'EMS 98 propose une corrélation entre l'intensité sismique et l'endommagement des bâtiments. -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. Sont fonctions de vulnérabilité basées sur l'observation lors d'un séisme passé et sur le jugement d'experts.	L'inconvénient de cette approche probabiliste est que l'évaluation des dommages est basée sur l'opinion des experts. Par conséquent, en plus des incertitudes de l'évaluation des dommages dues à la variabilité dans l'exécution réelle des constructions, on a celles liées à l'opinion des experts. Par ailleurs, une approche déterministe fondée sur des modèles numériques ou analytiques peut être la plus appropriée pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique.	Kassoul, 2016

	VULNERALP	2007	<p>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 ». Il s'agit d'une méthode « à étages » permettant de mettre en œuvre différents niveaux d'analyse de plus en plus précise et impliquant une mobilisation progressive des moyens.</p>	<p>Elle consiste à estimer le dommage moyen en conformité avec l'échelle européenne à partir de recherches visuelles de critères structuraux simples. P permet d'obtenir des informations simples et élémentaires sur la vulnérabilité des constructions à grande échelle.</p>	<p>-De fortes marges d'erreurs. -Paramètres pris en compte dans l'estimation de la vulnérabilité.</p>	<p>(Verrhiest , 2008 ; Guéguen, 2007)</p>
	RISK-UE	Européenne 2001	<p>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</p>	<p>-La méthode Risk-UE qui définit une typologie plus détaillée que l'EMS98, est ainsi moins sensible que GNDT au contexte local, en plus cette méthode ΔV_f qui permet de réduire l'intervalle d'incertitudes (BRGM, 2008) -Elle donne un indice de vulnérabilité pour chaque type de bâtiment,</p>		<p>(Belmouden et Lestuzzi, 2006)</p>

	<p>Italienne (GNDT) (Groupe National de Défense contre les Tremblements de terre)</p>	<p>créé par le conseil national de la recherche italien en 1983</p>	<p>développée par le GNDT La méthode a fait l'objet d'adaptations pour tenir compte des enseignements apportés par les tremblements de terre ultérieurs. La méthode revient au final avec 4 classes des vulnérabilités : A,B,C,D.</p>	<p>La méthode s'applique sur toute 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</p>		<p>(Verrhiest, 2008)</p>
	<p>Japonaise</p>	<p>Japon 1977</p>	<p>Dans cette méthode la performance sismique est représentée par un indice de performance sismique (Is) qui doit être calculé dans toutes directions de construction suivant les règles de l'art et parasismique suivant l'équation suivante : $Is = E0 \times Sd \times T$.</p>			<p>(Verrhiest, 2008)</p>
	<p>Grille Suisse</p>	<p>2003 par L'Office Fédéral des eaux et de la Géologie suisse</p>	<p>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.</p>			<p>(Verrhiest, 2008)</p>

	Néo-Zélandaise	New Zélande Society for Earthquake Engineering en 2000	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).			(Verrhiest, 2008)
	HAZUS Américaine	Développée par le NIBS (National Institute of Building Science) et supportée par la FEMA (Fédéral Emergency Management Agency) en 1999 Appliquée à la ville de Grenoble	Attribuer au bâtiment selon son système constructif une note associée au risque structurel, elle varie entre 1.6 et 7.4. Elle correspond à la probabilité d'effondrement d'un bâtiment.	Construire des modèles Définition du dommage Calculer la probabilité de dommage de manière analytique. C'est une méthode rapide d'évaluation de la vulnérabilité sismique. Il est recommandé de procéder au diagnostic détaillé du bâtiment avant l'évaluation de sa vulnérabilité.		(Belmouden et Lestuzzi, 2006)

Méthode mécanique	Courbes de capacité		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.			
	Courbes de fragilité		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			
	La méthode de push-over		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.	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.	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.	(Ourabah et al, 2010)

I.5 Méthodes multicritères d'aide à la décision – Un outil faible pour l'évaluation de la vulnérabilité

Les méthodes d'aide à la décision multicritère sont largement utilisées pour résoudre les problèmes de la sélection dans la plupart des domaines (du système de planification des ressources d'entreprise, du service cloud, des partenaires de collaboration et des scénarios agricole, etc.). Elles aident les décideurs à considérer tous les critères du problème en utilisant un processus décisionnel rationnel et efficace.

I.5.1 Définition et terminologie

I.5.1.1 Notions de décision et d'aide à la décision

La décision est une action qui est prise pour résoudre un problème qui se pose à l'individu ou à l'organisation. Certaines écoles considèrent simplement la décision comme étant « un choix entre plusieurs alternatives ».

[Mintzberg](#), définit la décision, qu'elle soit individuelle ou collective, comme « l'engagement dans une action, c'est-à-dire une intention explicite d'agir ». Elle a pour but la résolution de problèmes qui se posent à l'organisation ou à l'individu ; et elle peut correspondre à un changement de l'environnement (comportement réactif) ou au désir de saisir une opportunité et ainsi changer l'environnement (comportement d'anticipation) ([Abdelhadi, 2019](#)).

L'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement clairement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourants à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution d'un processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part ([Henriet, 2010](#)).

I.5.1.2 Le décideur et/ou l'homme d'étude

Le décideur est l'entité intervenant dans le processus de décision que les modèles mis en œuvre cherchent à éclairer, c'est l'entité pour le nom de qui, ou au compte de qui, l'aide à la décision s'exerce.

Contrairement à certaines idées, le décideur n'est pas nécessairement un individu en particulier. Il peut être dans certains cas un individu mais il peut être aussi un groupe d'individus pas nécessairement bien identifié (ex. le gouvernement, les personnes qui le composent peuvent évoluer rapidement sans pour autant empêcher que des décisions soient prises en continu).

L'homme d'étude est celui qui prend en charge l'aide à la décision. Mettant en œuvre des modèles dans le cadre d'un processus de décision, il contribue à l'orienter et à la transformer. Le décideur est l'entité qui va prendre la décision en assumant la responsabilité. Il cherche au travers de l'aide à la décision, non pas un moyen de prendre les décisions à sa place, mais un moyen d'éclairer et aussi de justifier ses décisions. On parlera donc de méthodes d'aide à la décision plutôt que de méthodes de prise de décision. L'homme d'étude va donc être celui qui aide le décideur au cours du processus d'aide à la décision. C'est lui qui a la connaissance des méthodes d'aide à la décision.

En revanche, il n'a aucunement pour fonction de prendre la décision mais a avant tout un rôle de conseil et d'éclaircissement. L'aide à la décision va avoir de multiples rôles, et principalement d'aider à mieux formuler les problèmes à résoudre, d'aider à mieux communiquer afin de que les différents acteurs puissent mieux se comprendre. Ainsi nous voyons que l'aide à la décision apparaît comme une approche beaucoup plus large que celle de la prise de décision (Henriet, 2010).

I.5.1.3 Action potentielle

Une action potentielle est une action réelle ou fictive provisoirement jugée réaliste par un acteur au moins, ou présumée telle par l'homme d'étude, en vue de l'aide à la décision ; l'ensemble des actions potentielles sur lequel l'aide à la décision prend appui au cours d'une phase d'étude est noté A (Henriet, 2010).

I.5.2 Approche multicritère

Une approche multicritère a comme principale caractéristique qu'elle formalise (ou modélise) la préparation des décisions. Tout d'abord, elle améliore la transparence du processus de décision. Ensuite, elle définit, précise et met en évidence la responsabilité du décideur. Bernard Roy caractérise le paradigme multicritère comme un nouveau schéma de pensée pour comprendre ou agir sur un système, en considérant que :

Plusieurs critères sont à l'œuvre pour conduire le système ou guider son évolution, Ces critères sont, moins localement conflictuels, les compromis ou arbitrages ont pour objet de conférer aux critères des valeurs compatibles avec une certaine forme d'équilibre et, s'il y a succession, cela tient au caractère transitoire de l'équilibre atteint (Mukonki, 2017).

I.5.2.1 Le critère

Un critère est une fonction g , définie sur l'ensemble A des actions, qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné, et qui représente les préférences du décideur selon un point de vue (Henriet, 2010).

I.5.3 L'aide à la décision multicritère

D'après Vincke : « l'aide à la décision multicritères vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision où plusieurs critères souvent contradictoires, doivent être pris en compte, elle permet de modéliser de la manière la plus fidèle possible les préférences d'un expert, une telle modélisation permet ensuite la construction d'outils adaptés et capables d'assister ou de remplacer un décideur sur des problèmes complexes ».

Mareschal (1998), de son côté, affirme que : l'analyse multicritère est une sorte de prolongement de la recherche opérationnelle, mais pas une rivalité qui cherche à l'éliminer. Pour (Roy, 1998), le paradigme multicritère représente un nouveau schéma de pensée pour comprendre ou agir sur un système en considérant que plusieurs critères sont à l'œuvre pour conduire le système ou guider son évolution, ces critères sont, au moins localement, conflictuels, ils tendent à faire se succéder des compromis ou invitent à procéder à un arbitrage et ces compromis ou arbitrages ont pour objectif de conférer aux critères des valeurs compatibles avec une certaine forme d'équilibre et s'il y a succession, cela tient au caractère transitoire de l'équilibre atteint.

I.5.4 Les approches multicritères

Avant l'émergence de l'analyse multicritère, les problèmes de décision se ramenaient la plupart du temps à l'optimisation d'une fonction économique. Cette approche avait l'avantage de déboucher sur des problèmes mathématiques qui étaient clairement posés mais qui ne reflétaient pas toujours les situations décisionnelles abordées.

Différentes approches multicritères peuvent être distinguées, Pomerol et Barba-Romero (1993) présentent un large panorama des différentes méthodes existantes (méthodes purement ordinales, somme pondérée, méthodes fondées sur l'utilité, méthodes de sur classement, etc.) ainsi qu'une revue importante des logiciels existants. Par ailleurs, Roy (1985) présente dans le détail les méthodes de critère unique de synthèse et les méthodes sur classement, et Roy et Bouyssou (1993) présentent en plus des exemples d'application.

Nous ne présenterons pas ici toutes les approches existantes, nous distinguerons simplement les approches de critère unique de synthèse et de sur classement. Tout d'abord, le critère unique de synthèse : cette approche consiste à considérer que les différents critères g_1, \dots, g_n peuvent être agrégés en un critère unique $g = f(g_1, \dots, g_n)$, ce qui permet de juger les actions uniquement sur l'évaluation de ce critère unique. L'utilisation de ce type de critère conduit à une structure de pré ordre sur les actions de A. Il convient cependant de ne pas confondre cette approche avec une approche monocritère. En effet l'approche monocritère, même si elle permet aussi de juger les actions sur un critère unique, n'appréhende pas plusieurs dimensions de préférence.

L'autre approche, appelée approche du sur classement de synthèse (Roy, 1985), consiste à établir des préférences critère par critère (à l'aide de relations de sur classement monocritère) puis à agréger ces relations en une relation de sur classement global. On notera $S_j; \forall j \in (1, \dots, n)$ la relation de sur classement restreinte au critère j. Cette approche conduit à une structure où la relation de préférence considérée entre les actions de A n'est pas nécessairement transitive et la structure de préférence qui en découle n'est pas non plus nécessairement complète.

Ces deux approches divergent donc principalement par la prise en compte de préférence critère par critère dans l'approche du sur classement de synthèse. En effet, alors que l'approche du critère unique de synthèse se contente d'agréger directement les performances des actions, l'approche du sur classement de synthèse passe par une étape supplémentaire en édictant des préférences critères par critères. Ce sont ces préférences monocritères qui doivent ensuite être agrégées pour asseoir une comparaison entre actions (Henriet, 2010).

I.5.5 Domaine d'application

Les méthodes multicritère d'aide à la décision sont souvent utilisées comme une aide lors de la résolution de différentes catégories de problèmes de décision qui peuvent survenir dans divers domaines :

- Application à l'industrie aéronautique (Slavica , 2019) ;
- Application dans développement énergétique durable (Indre et al, 2018) ;
- Application avec la modélisation de l'informatique des bâtiments (Tan Tan, 2021) ;
- Application en science de l'environnement (Jeffrey et al, 2017) ;
- Application pour la gestion des infrastructures (Golan et al, 2014) ;
- Application dans l'évaluation des systèmes énergétiques (Witt, 2022), et pour les systèmes d'énergies solaire (Sahim, 2022) ;
- Application dans les problèmes de diagnostic médical (Thoa, 2019) ;
- Application dans la gestion de tourisme (Akincilar, 2014) ;
- Application dans la technologie de l'information (Oztayas, 2014) ;
- Etc.

Les MMAD sont largement utilisées pour résoudre les problèmes de la sélection dans la plupart des domaines (du système de planification des ressources d'entreprise, du service Cloud, des partenaires de collaboration et des scénarios agricole, etc.). Elles aident les décideurs à considérer tous les critères du problème en utilisant un processus décisionnel rationnel et efficace.

Elles s'utilisent habituellement dans le domaine du management d'entreprise (ou de projet) lorsqu'un ou plusieurs décideurs se trouvent confrontés à des problèmes de choix ou d'évaluation (Griot, 2002).

I.5.6 Processus d'aide à la décision multicritère

Le processus d'aide à la décision multicritère se compose en quatre étapes fondamentales qui sont représentées dans la Figure I.7 :

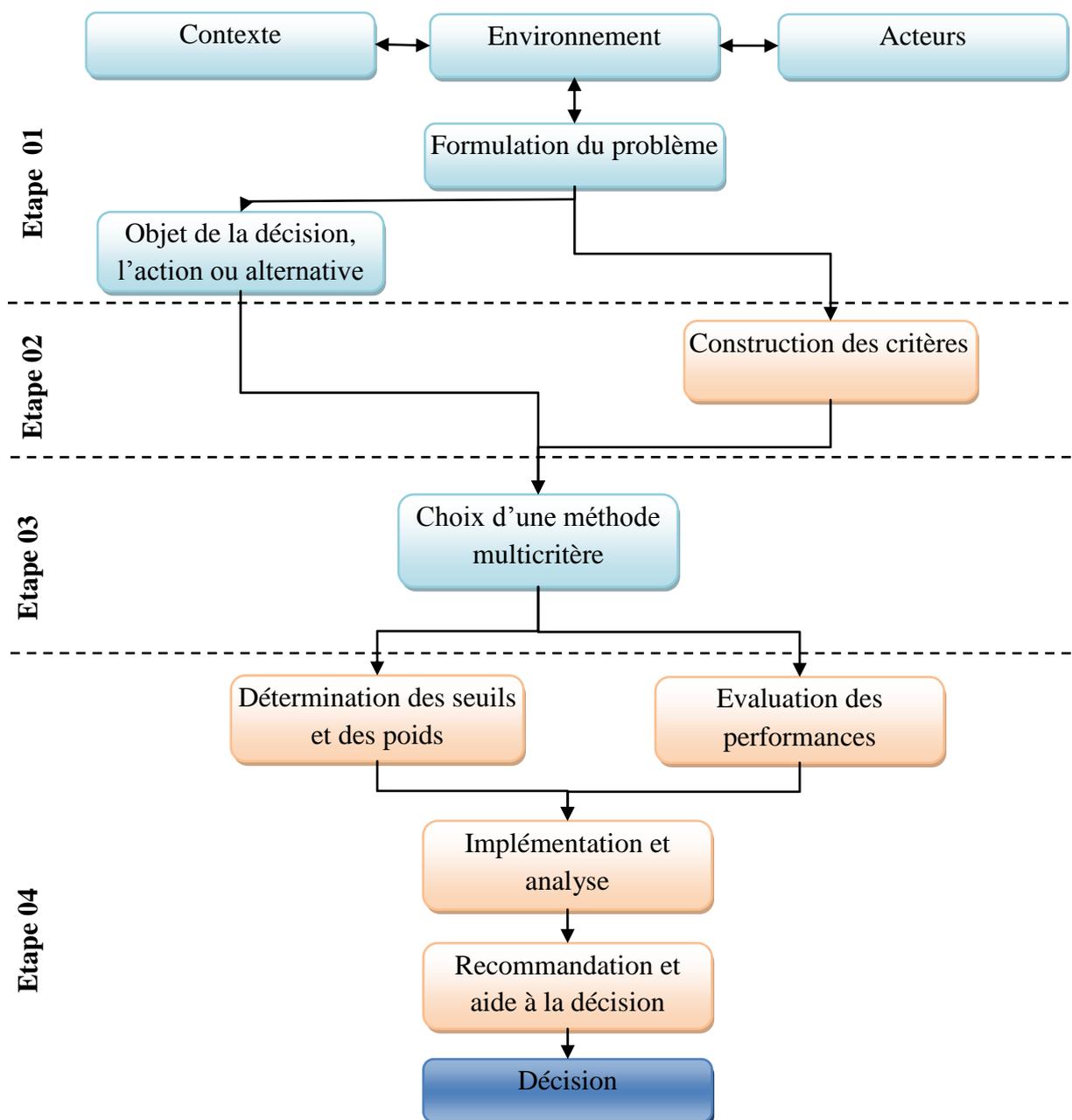


Figure I.7. Processus de décision multicritère (Nafi et Werey, 2009)

A. Étape 1. Définition du problème et de l'objet de la décision

La définition du problème repose sur la définition de la nature du problème à traiter en le formulant soit en une problématique du choix, du tri, du rangement ou bien de description. Pour la détermination de l'objet de la décision, cela consiste à identifier les alternatives potentielles sur lesquelles va porter la décision.

B. Étape 2. Analyse des conséquences et détermination des critères

Lors de cette étape, il faut identifier et mesurer les conséquences des alternatives. Une alternative a , le plus souvent, plusieurs conséquences en fonction d'un critère donné (Jacquet-

Lagrèze et al., 1980). Pour la construction des critères, il s'agit d'identifier les enjeux et la nature des conséquences possibles sur les alternatives potentielles. Ces critères nécessitent une évaluation de la contribution et l'influence de chaque critère dans la décision finale. Ceci est traduit par la pondération des critères.

C. Étape 3. Choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère

Le choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère dépend du type du problème posé.

D. Étape 4. Performance des alternatives

Quand l'analyse des conséquences des alternatives potentielles est basée sur plusieurs critères, c'est l'analyse multicritère qui donne une réponse au problème posé par l'utilisation par exemple du seuil de préférence, d'indifférence et de veto dans certaines méthodes.

I.5.7 Méthodes multicritères d'aide à la décision (MMAD)

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.8.

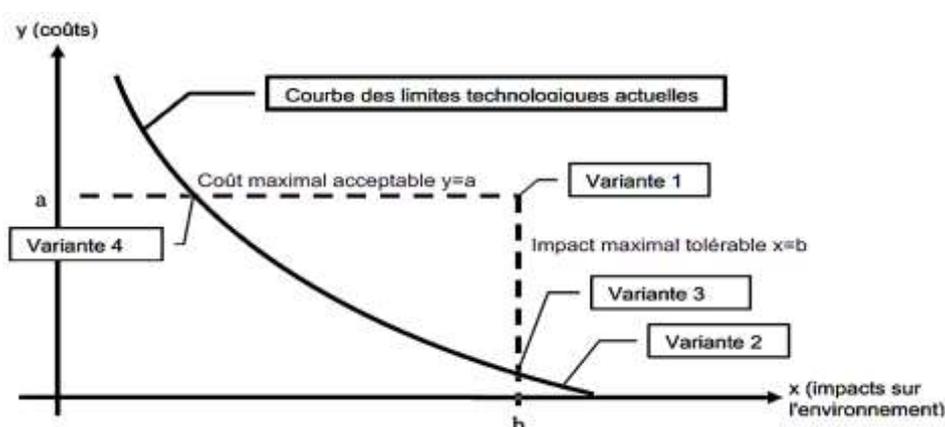


Figure I.8. Recherche de la solution optimum (Brunner et Starkl 2004)

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.5ci-dessous :

Tableau I.5. Méthodes multicritères d'aide à la décision

Groupe	Méthode	Référence
Méthodes de notation	Simple additive weighting (SAW)	(Friyadie, 2016) (Brans, 2005)
	Complex proportional assessment (COPRAS)	
Méthode 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)	
	Data envelopment analysis (DEA)	
Méthode par paires de comparaison	Analytic hierarchy process (AHP)	
	Analytic network process (ANP)	
	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH)	
Méthode de sur-classement	Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE)	
	Elimination and choice expressing reality (ELECTRE)	
Méthode utilitaires/évaluation	Multi-attribute utility theory (MAUT)	
	Multi-attribute value theory (MAVT)	
Méthode de vulnérabilité sociale	Méthode d'évaluation spatio-temporelle (MOVISS)	
	Analyse multicritère spatial (SEVI) et Indice de vulnérabilité sociale (SoVI)	

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).

Méthode	Domaine d'application	Objective	Avantages	Inconvénients	Référence
SAW Zionts Wallenius 1983	Utilisée dans le contexte du problème de sélection de réseau	Elle démontre clairement l'idée intégrant les valeurs et les poids des critères en une seule estimation de la valeur du critère	- Capacité à compenser entre les critères. - Intuitif pour les décideurs. - Le calcul est simple ne nécessite pas de programmes informatiques complexes.	- Les estimations révélées ne reflètent pas toujours la situation réelle. - Le résultat obtenu peut ne pas être logique.	(Benmammar, 2020)
CP Zeleny en 1973		Son idée de base est de définir un sous-ensemble de Solutions efficaces les plus proches de l'idéal et un point infaisable, qui est tout pour Les normes ont été améliorées.	Le CP a l'avantage d'avoir une fonction objective facile à formuler.	- La résolution du modèle CP peut être beaucoup plus difficile dans le cas où on dispose d'un ensemble de contraintes à respecter. - Le défaut de CP est de proposer une action médiocre si toutes les actions ne sont pas bonnes. Le CP exige une articulation a priori des préférences.	(Ayadi, 2012 ; Ardil, 2021)
GP Charnes et al 1961	La comptabilité et l'agriculture Planification, prévision de la gestion de l'énergie et du portefeuille et des ressources en eau Planification et gestion des bibliothèques et de la programmation des médias	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.	Le GP a l'avantage d'aborder les problèmes sous l'angle de satisfaction d'objectifs. - Le GP s'avère utile pour modéliser des problèmes qui n'ont pas de solution optimale.	Le GP dans sa forme standard peut générer des solutions non « performantes » dans le cas où les objectifs sur les critères sont fixés de façon pessimiste.	(Ayadi, 2012)

<p>TOPSIS Hwang et Yoon en 1981</p>	<p>Choix du fournisseur Gestion logistique Optimisation de la fabrication</p>	<p>consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale et de s’éloigner le plus possible de la pire solution pour tous les critères.</p>	<p>L’apport de la méthode TOPSIS est l’introduction des notions d’idéal et d’anti-idéal. Elle est facile à appliquer.</p>	<p>Les attributs doivent être de nature cardinale, les préférences sont fixées a priori. -Si toutes les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises.</p>	<p>(Aruldoss, 2013 ; Marttunen, 2017)</p>
<p>DEA Charnes et al. (1978, 1981)</p>	<p>organisations publiques (hôpitaux, EMS, services sociaux, offices de chômage, usines électriques, unités de police etc.) et dans le secteur privé (banques, assurances, commerces de détail</p>	<p>DAE est une méthode où il est utilisé pour trouver l’efficacité de combinaison de plusieurs entrées et multi sorties du problème</p>	<p>Capable de gérer plusieurs entrées et sorties.</p>	<p>Ne traite pas de données imprécises -Suppose que toutes les entrées et sorties sont exactement connues.</p>	<p>(Aruldoss, 2013)</p>
<p>AHP développée par Saaty en 1980</p>	<p>Application de l’ingénierie de la logistique et du transport Gestion des ressources Planification énergétique Sélection de la stratégie</p>	<p>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 œuvre par son pouvoir.</p>	<p>La sélection de cette méthode est due principalement à sa simplicité d’application, la facilité de compréhension pour résoudre des problèmes non structurés, la flexibilité et la capacité à rapprocher les critères quantitatifs et qualitatifs dans le même cadre décisionnel.</p>	<p>Un grand nombre d’éléments dans le problème de décision fait exposer le nombre de comparaisons par paires. -Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s’inverser suit à une modification (ajout ou suppression d’un ou plusieurs actions) de l’ensemble des actions. -L’association d’une échelle numérique à l’échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.</p>	<p>(Ayadi, 2012 ; Aruldoss, 2013 ; Marttunen, 2017)</p>

<p>MACBETH Costa et al 1994</p>		<p>Elle permet de traduire les jugements sémantiques énoncés par un décideur sur une échelle numérique à travers des comparaisons par des experts de différentes situations</p>	<p>-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 sur interaction, limitées aux paires de critères.</p>	<p>Les échelles de la méthode MACBETH ne sont pas bornées. -Dans la méthode MACBETH la détermination des constantes d’échelle suit le même processus que pour la détermination des échelles d’attractivité.</p>	<p>(Ayadi, 2012)</p>
<p>PROMETHEE Jean-Pierre Brans en 1985</p>	<p>sont utilisées dans de nombreux cas de recherche opérationnelle, et plus récemment dans la prise de décision en matière environnementale.</p>	<p>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.</p>	<p>La méthode PROMETHEE I construit une relation de sur classement évaluée traduisant une intensité de préférence La méthode PROMETHEE II construit un préordre total excluant l’incomparabilité et réduisant fortement l’indifférence.</p>	<p>-La méthode PROMETHEE I : l’indifférence est en pratique très rare vu les nombreux calculs pour obtenir les flux. -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 $\phi(a)$ de chaque action.</p>	<p>(Ayadi, 2012 ; Marttunen, 2017)</p>
<p>ELECTRE Roy et al, 1968</p>	<p>Utilisée pour l’environnement et l’énergie aussi pour les problèmes de réseau de métro</p>	<p>a été la première méthode inclure une approche de surclassement basée sur des comparaisons par paires entre les alternatives sous chaque critère séparément</p>	<p>La méthode ELECTRE I est utilisée pour des problématiques de sélection. -Elle introduit la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l’étude pour s’intéresser uniquement aux meilleures actions.</p>	<p>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.</p>	<p>(Ayadi, 2012 ; Marttunen, 2017)</p>

<p>MAUT Développée par Keeney et Raifa en 1976</p>	<p>Elle s’applique dans un contexte caractérisé par un ensemble d’actions explicite (fini), une articulation a priori des préférences, et un univers incertain (les évaluations des actions par rapport à chaque attribut sont incertaines)</p>	<p>Est une technique d’analyse de la décision qui permet la coexistence du jugement et de la mesure objective pour saisir la nature multidimensionnelle des problèmes de décisions.</p>	<p>La méthode MAUT permet les évaluations des actions par rapport aux attributs qui sont imprégnées d’incertitude (aléatoire).</p>	<p>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. -La construction de la fonction analytique V est une tâche ardue. -L’exploitation de la forme additive n’est possible que sous des hypothèques très restrictives du point de vue théorique.</p>	<p>(Ayadi, 2012)</p>
<p>MAVT développé par Keeney et Raifa en 1976</p>	<p>s’applique dans un contexte caractérisé par un ensemble d’actions explicite, une articulation a priori des préférences et un univers déterministe</p>	<p>La méthode MAVT repose sur l’idée fondamentale suivante : tout décideur essaie qui agrège inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction [, , gn] 1 V=V g tous les attributs</p>	<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>	<p>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. -La construction de la fonction analytique V est une tâche ardue. -L’exploitation de la forme additive n’est possible que sous des hypothèques très restrictives du point de vue théorique.</p>	<p>(Ayadi, 2012 ; Marttunen, 2017)</p>

<p>La logique floue Zadeh, 1960</p>	<p>La logique floue est utilisée dans les systèmes d’aide à la conduite des véhicules et d’aide au diagnostic médical, les outils assurantiels d’analyse et de prévention des risques, les intelligences artificielles qui gèrent le trafic routier et aérien, et également les modèles de prédiction météorologique et climatique</p>	<p>visé à prendre en compte les incertitudes qui existent au voisinage des seuils (due en partie à des principes de subjectivité).</p>	<p>-La logique floue possède l'avantage d'être intuitive et de pouvoir faire fonctionner une quantité importante de systèmes différents possédant une forte expertise humain. -La non nécessité modélisation. -L'emploi possible aussi pour des processus rapides.</p>	<p>-Il faut garder à l'esprit qu'en logique floue, il est impossible de prédire les performances d'un système. -L'approche artisanale et non systématique. -L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité.</p>	<p>(Boukaka, 2015 ; Bourahla,2000)</p>
<p>Algorithme génétique Par Holland 1962</p>	<p>On retrouve les AG dans différents domaines d'applications, notamment en Bioinformatique, Phylogénie, Économie, Sciences numériques, Robotiques, Industries, Mathématique, Physique et Chimie.</p>	<p>Les AG appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur but est d'obtenir une solution approchée à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte (ou que la solution est inconnue) pour le résoudre en un temps raisonnable.</p>	<p>Les AG présentent un fort potentiel d'applications pratiques. D'ailleurs, ils sont de plus en plus utilisés et ce, dans de multiples domaines. Il faut dire qu'ils fournissent d'excellentes performances à de faibles coûts.</p>	<p>Malheureusement, de nombreux inconvénients viennent ternir ce tableau. En effet, il n'y a pas de garantie quant à l'obtention de la solution optimale au problème posé en un temps fini. L'utilisation de ces algorithmes est souvent coûteuse en temps de calculs (les algorithmes sont lents).</p>	<p>(Nicolas, 2017 ; Christelle, 2008)</p>

<p>Réseau des neurones Warren McCulloch et Walter Pitts 1950</p>	<p>-traitement du signal -traitement d'image -traitement automatique des langues -modélisation de l'apprentissage et perfectionnement des méthodes de l'enseignement.</p>	<p>Un réseau de neurones artificiels a pour objectif de simuler l'intelligence humaine, par le biais de neurones qui imitent le fonctionnement du cerveau humain. Les neurones artificiels sont intégrés dans des logiciels et permettent aux machines de devenir autonomes, par la technologie de l'intelligence artificielle</p>	<p>Le réseau apprend à partir d'exemples et s'adapte aux situations en fonction de ses conclusions. Il généralise les connaissances pour produire des réponses adéquates à des situations inconnues. Réseaux de neurones artificiels résoudre des problèmes complexes qui sont difficiles à gérer par approximation.</p>	<p>Réseaux de neurones ne peuvent pas être recyclés. Si vous ajoutez des données plus tard, c'est presque impossible à ajouter à un réseau existant. La VC dimension des réseaux de neurones n'est pas claire. Ceci est très important lorsque vous songez à la façon dont une bonne solution pourrait être.</p>	<p>(Claude, 2016)</p>
<p>Colonie des fourmis Marco Dorigo et al. Dans les années 1990</p>	<p>Applications au problème symétrique et asymétrique de voyageur de commerce, problème d'ordonnancement séquentiel, problèmes d'affectation quadratique...</p>	<p>L'algorithme des colonies des fourmis est une heuristique, avec caractère général utilisée pour résoudre différentes problèmes d'analyse combinatoire s'applique a plusieurs types de problèmes.</p>	<p>Très grande adaptabilité. Parfait pour les problèmes basés sur des graphes.</p>	<p>Un état bloquant peut arriver. Temps d'exécution parfois long. Ne s'applique pas à tous type de problèmes.</p>	<p>(Djoko et al., 2016)</p>

I.5.8 Méthodes d'aide à la décision les plus utilisés dans la littérature

I.5.8.1 Simple additive weighting (SAW)

La méthode SAW (pondération additive simple) est une des 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 (Hadjadj et Abdi, 2018).

Déroulement de la méthode

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

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

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

I.5.8.2 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.

1.5.8.3 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 :

$$\sum_{i=1}^p (\delta_i^+ + \delta_i^-)$$

Sujet à : $C_1(x) \leq 0, l = 1, 2, \dots, l$

$$g_i(x) - \delta_i^+ + \delta_i^- = b_i, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\delta_i^+, \delta_i^- \geq 0$$

δ_i^+ : L'écart positif de par rapport au but ;

δ_i^- : L'écart négatif de par rapport au but ;

$g_i(x)$: L'évaluation de la solution x par rapport au critère i ;

$C_1(x)$: 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 (δ_i^-) et en dessus (δ_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.5.9 Application des MMAD dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments d'habitation

I.5.9.1 Analytic Hierarchy Process - Méthode AHP

Depuis son introduction en 1977 par Saaty (Saaty, 1977), le processus de hiérarchie analytique (AHP) a trouvé sa place dans divers domaines de décision. L'AHP permet la structuration d'un problème de décision en hiérarchies où les objectifs sont généralement désignés au niveau supérieure, les critères et sous-critères au niveau intermédiaire, et les alternatives au niveau inférieur. Une fois le problème structuré, les jugements de valeur concernant les alternatives par rapport aux sous-critères du niveau supérieur suivants doivent être déterminées de comparaisons par paires. Chaque comparaison est basée sur une échelle verbale ou numérique (allant de 1 à 9). Des valeurs composites indiquant les priorités globales de l'alternative sont ensuite déterminées en trouvant des valeurs moyennes pondérées à tous les niveaux de la hiérarchie. Les classements des alternatives qui en résultent sont à la fois transitifs et complets. Cependant, l'introduction de nouveaux éléments de décision (c.-à-d. des alternatives et des critères) nécessite la répétition des comparaisons par paires pour rétablir un ordre de classement, et peut entraîner une perte d'informations en convertissant les données quantitatives sur une échelle de 1 à 9.

A. Application de la méthode AHP dans la construction

L'une des premières applications de l'AHP dans la construction est due à Skibniewski et Chao (Skibniewski et Chao 1992), qui ont discuté des avantages que cette technique pourrait introduire dans les évaluations techniques et économiques. Une étude de cas basée sur le

processus de sélection d'une grue à tour a été soumise pour démontrer l'applicabilité de la méthode.

El-Mikawi et Mosallan (1996) ont utilisé l'AHP comme outil d'assistance pour évaluer l'utilisation des matériaux composites dans les applications de génie civil structurel au moyen d'une hiérarchie structurelle quasi durable. À leur tour, Hastak et Halpinont (2000) procédé à une pondération des facteurs nécessaires pour développer une évaluation des coûts et des avantages des matériaux composites dans la construction sur l'ensemble du cycle de vie. La proposition a été clarifiée par un exemple pratique dans lequel la réhabilitation des colonnes de pont a été étudiée en utilisant soit des solutions composites soit des solutions traditionnelles.

Kalamaras et al. (2000) ont utilisé une procédure simple d'agrégation des scores combinée à la méthode AHP pour la sélection des tracés d'autoroute. De cette manière, cinq alternatives différentes ont été évaluées selon un ensemble de quatre critères : rayon de courbure minimum, longueur cumulée des sections normales, longueur cumulée des sections de tunnel et longueur cumulée des sections de viaduc. Al-Harbi (2001) a mené une étude dans laquelle l'AHP est mise en oeuvre comme méthode de prise de décision pour évaluer le problème de pré qualification des entrepreneurs. Ainsi, des comparaisons par paires ont été effectuées pour corréler les performances de plusieurs entrepreneurs possibles par rapport à chaque critère et pour comparer l'importance de chaque critère par rapport à un autre. De la même manière, Topcu (2004) et Abudayyeh et al. (2007) ont appliqué d'autres modèles de sélection pour établir un classement préférentiel en vue de la présélection des contractants. Comme outil complémentaire d'un système heuristique pour déterminer la meilleure combinaison d'ensembles de construction dans les phases de conception. Nassar et al. (2003) ont utilisé la méthode AHP pour mesurer l'importance relative parmi un ensemble de critères. Une fois que les préférences ont été établies, le problème a été structuré comme un réseau dans lequel un algorithme localise la meilleure solution en recherchant le chemin le plus long. Saphira et Goldenberg (2005) ont adapté le système AHP pour élaborer un modèle de sélection des équipements pour les projets de construction. Sa hiérarchie a été structurée en divisant le problème en quatre critères et dix-huit sous-critères, qui ont été abordés selon trois perspectives : l'évaluation des coûts, l'évaluation des bénéfices et l'évaluation totale.

En l'absence d'un guide quantitatif pour la gestion des budgets des projets de construction à Taïwan, Lai et al. (2008) ont présenté une méthode basée sur l'AHP pour mieux les répartir.

Parallèlement à la pondération des critères au moyen de ce système, un modèle de simulation des coûts a également été réalisé pour générer une distribution cumulative du budget d'un projet.

Zayed et al. (2008) ont cherché à réduire le risque inhérent aux projets de construction d'autoroutes en développant un modèle basé sur la technique AHP. La première étape a consisté à rassembler des informations sur les sources de risque et d'incertitude susceptibles d'affecter le projet de construction. Ensuite, le système AHP a été utilisé Pour construire un modèle d'évaluation visant à déterminer un indice de risque en agrégeant une série de pondérations de notes obtenues précédemment. De nos jours, l'analyse du cycle de vie (ACV) est l'un des outils les plus utilisés pour déterminer les impacts environnementaux des produits et des processus.

Knoeri et al (Knoeri et al 2011) ont mené une étude basée sur l'AHP pour évaluer l'attitude des acteurs de la construction en matière de réutilisation des matériaux de construction minéraux Recyclés (RMCM) et les critères sur lesquels repose leur mode opératoire à cet égard.

Dans la mesure où l'une des tâches les plus difficiles pour un ingénieur civil est la conception de structures capables de faire face aux sollicitations sismiques, Bitarafan et al. 2013. Ont noté la nécessité d'une approche multicritère pour prendre en compte ce phénomène naturel. Parmi ses composantes, une approche AHP traditionnelle a été utilisée pour traiter les comparaisons par paires fournies par un groupe d'experts sélectionnés.

Kayashta et al. (2013) ont introduit la méthode AHP dans un modèle visant à créer un indice de susceptibilité aux glissements de terrain afin de localiser les zones les plus sensibles à ce type d'échec dans l'ouest du Népal. Tous les facteurs qui ont une influence sur les instabilités du sol ont été classés puis intégrés en utilisant la procédure de la somme linéaire pondérée.

Wankhade et Landage (2013) ont mis au point une méthode d'essai non destructif pour détecter les défaillances internes des structures en béton. L'une des composantes de ce système était l'AHP, chargée de peser les valeurs des critères sélectionnés pour évaluer l'état de la structure.

I.5.9.2 Méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS a été introduite à l'origine par [Hwang et Yoon, \(1981\)](#), TOPSIS est basée sur le principe que la solution privilégiée doit être simultanément aussi proche que possible d'une solution idéale positive, *PID*, et aussi éloignée que possible d'une solution négative-idéale. La solution idéale positive représente la solution à bénéfice maximal déterminé à partir d'une composition des meilleures performances indiquées dans la matrice d'évaluation équation (1). La solution idéale négative représente la solution à bénéfice minimal, qui est également une composition des pires valeurs de la matrice d'évaluation (équation 2). Le classement des alternatives selon TOPSIS est établi sur la base de la distance la plus courte par rapport la solution idéale positive et la plus longue par rapport la solution idéale négative. TOPSIS considère simultanément les distances par rapport aux deux solutions idéales, et un ordre de préférence est établi en fonction de leur proximité relative, et une combinaison de ces deux distances.

$$PID = \{ \max \theta_{y, aveci, j=1, 2, \dots, m} \} (1)$$

$$NID = \{ \min \theta_{y, aveci, j=1, 2, \dots, m} \} (2)$$

Application de TOPSIS dans la construction

[Rahman et al. \(2012\)](#) ont développé un système d'aide à la décision basé sur les connaissances (KDSS) pour soutenir la procédure de sélection des matériaux de toiture. L'analyse multicritères est apparue dans le processus sous la forme de la méthode TOPSIS, qui a fonctionné comme une partie du moteur d'inférence de cette technologie.

[Şimşek et al. \(2013\)](#) ont appliqué une approche de Taguchi basée sur TOPSIS pour optimiser les proportions du mélange de béton auto compactant à haute résistance (HSSCC), ce qui a donné lieu à un problème à réponses multiples dont le but est d'optimiser six facteurs de contrôle le caractérisant. Les résultats ont été comparés à ceux obtenus en utilisant la méthode de la surface de réponse (RSM).

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu différents méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments, il s'avère qu'il n'y a pas de méthode idéale : elles ont tous un principe général, à savoir l'identification de la typologie constructive et facteurs de vulnérabilité permettant d'estimer un niveau global de vulnérabilité de l'ouvrage.

En suite nous avons vu que les méthodes multicritère d'aide 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.

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.

Chapitre 02

**Vulnérabilité des bâtiments
d'habitation en Algérie - État
des lieux**

II.1 Introduction

Après l'incroyable croissance démographique qu'a connue l'Algérie, qui est passée de 11,28 millions d'habitants en 1960 à plus de 44,6 millions d'habitants en 2022, l'attention portée au secteur de la construction est nécessaire et s'inscrit dans le cadre du développement humain.

Après l'indépendance, l'Algérie a été confrontée à la remise en marche de l'économie nationale. C'est ainsi que les autorités dans la charte de 1964 ont donné la priorité à l'investissement de l'industrie lourde. L'Etat Algérien s'est attelé, depuis l'année 1975 à nos jours, à développer à travers toutes les villes un important programme de logements publics de type grands ensembles collectifs afin de répondre aux besoins croissants de la population (Moussaoui et Cherrared, 2014).

L'Algérie a réalisé entre 2000 et 2017 des avancées exceptionnelles en terme de réalisation de logements, matérialisés notamment par :

- Près de 3.6 millions de logements livrés ;
- Près de 1 million de logements en cours de réalisation.

Le parc national de logements a atteint à fin 2019 près de 9 900 000 logements.

Le Nord de l'Algérie a connu plusieurs séismes forts à modérés. Les plus violents séismes enregistrés le 10 octobre 1980 à El-Asnam (Chlef actuellement), d'une magnitude $M = 7.3$ a causé plus de 5000 victimes, et le séisme du 21 mai 2003 qui a affecté la région de Boumerdes.

Cette activité sismique est due principalement à la nature géologique de la région maghrébine et à ses caractéristiques tectoniques à la frontière des plaques Africaine et Eurasienne qui sont en mouvement permanent.

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

II.2 Vulnérabilité du territoire algérien – Contexte général

II.2.1 Problématique de la vulnérabilité du territoire national

II.2.1.1 Situation sociale

A. Démographie de l'Algérie

En 2016 la population de l'Algérie est évaluée à 40,4 million d'habitants contre 12,9 million en 1965, et en 2019 la population algérienne est passée à 43 million. D'après l'[Office National des statistiques](#) en 2021 plus de 44.6 million d'habitants.

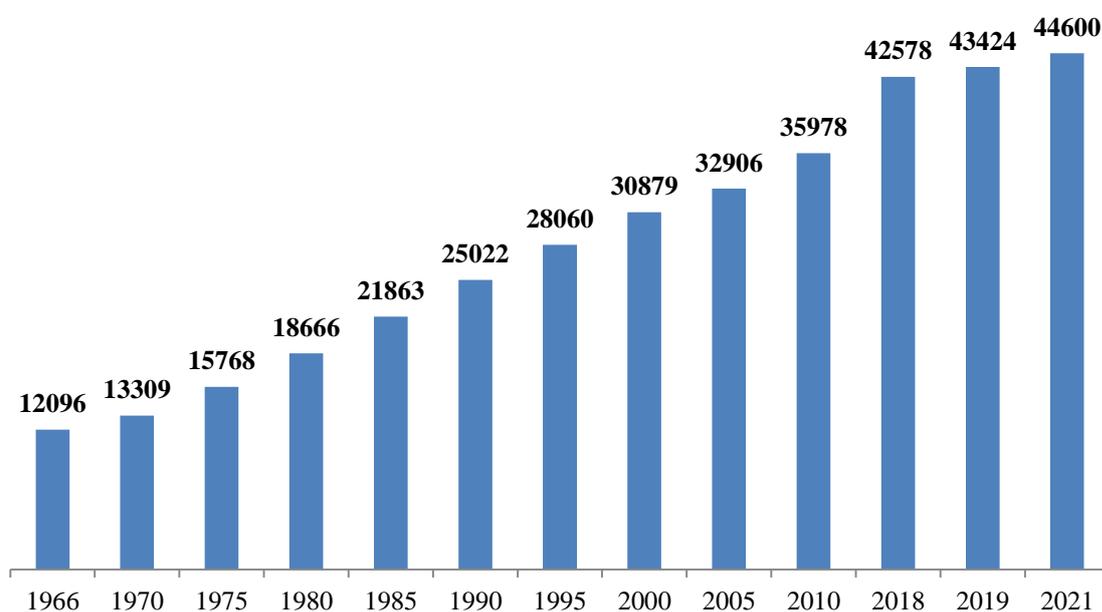


Figure II.1. Population algérienne de 1966 à 2021 (ONS, 2022)

B. Répartition de la population

La population algérienne est très inégalement répartie sur le territoire, en effet elle est très majoritairement concentrée à moins de 250 km du littoral méditerranéen, au-delà de 250 km au sud du littoral la population se fait rare hormis en quelques villes qui correspondent à des oasis.

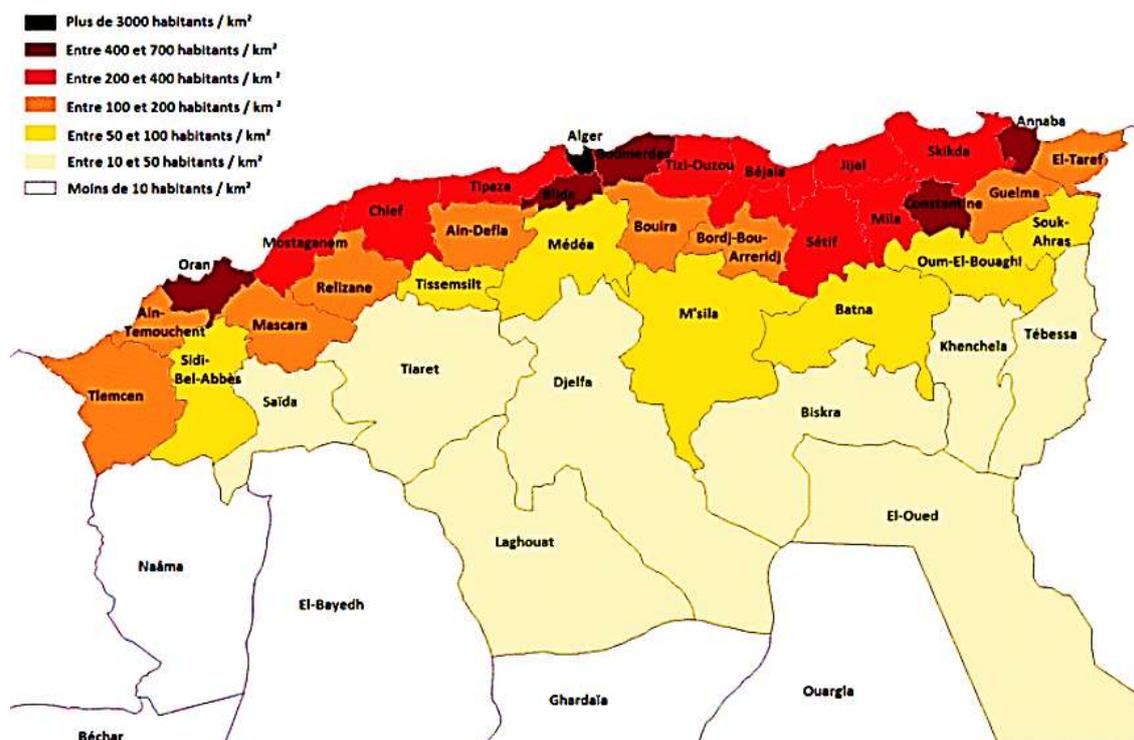


Figure II.2. Répartition de la population en Algérie (ONS, 2015)

C. Problèmes sociaux en Algérie

L’Algérie souffre de nombreux problèmes sociaux ce qui entraîne une vulnérabilité sociale. Nous mentionnons par la suite : le chômage, la pauvreté, la crise du logement, etc.

Le chômage

Bien que le chômage soit un phénomène que connaissent tous les pays du monde à différents niveaux de développement. L’Algérie, comme tous les autres pays du monde, est menacée par le chômage. Ce phénomène mondial affecte une part trop importante de la population active, dont Les taux de chômage sont élevés avec des disparités selon l’âge, le sexe et le niveau d’instruction.

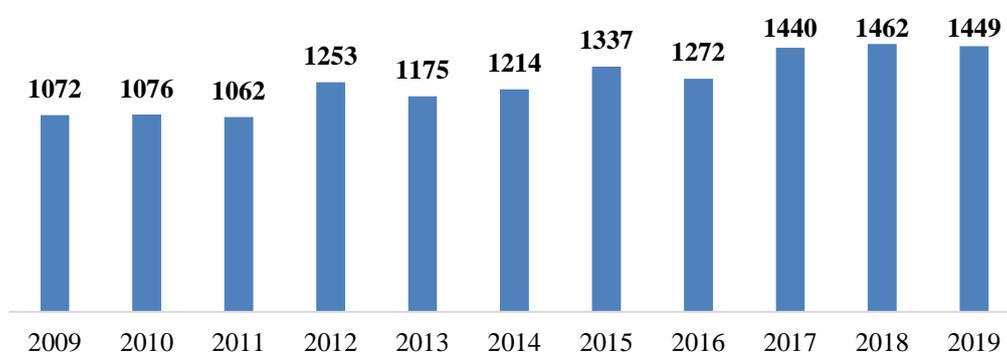


Figure II.3. Population en chômage en Algérie 2009-2019 (ONS, 2020)

La pauvreté

La propagation de la pauvreté à grande échelle représente toujours le principal défi auquel est confronté le peuple algérien vivant en dessous du seuil de pauvreté. Celui-ci est passé à 15 millions soit environ 38% des Algériens ont vu leur statut social s'est détérioré et ils sont devenus incapables acquérir les bases de la vie et le vrai sens de la pauvreté : privation ; impuissance ; la faiblesse et l'exclusion sociale (Revue science sociales, 2019).

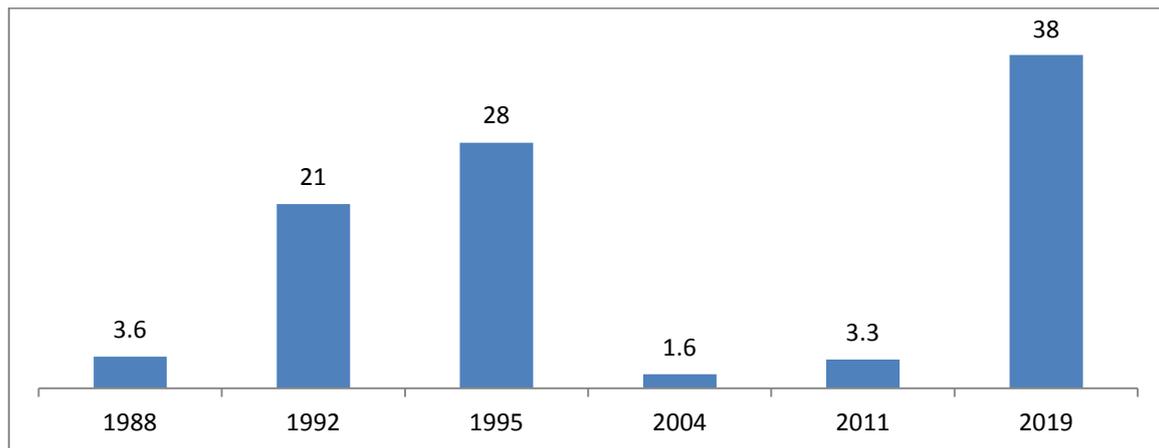


Figure II.4. Pauvreté en Algérie 1988-2019(en pourcentage) (source : revue de science sociales, 2019)

La crise du logement

Le problème du logement est l'un des problèmes les plus importants dont souffrent les sociétés contemporaines, en particulier les pays sous-développés qui sont sur la voie de la croissance dont l'Algérie.

Bien que ce secteur ait reçu une attention particulière de la part de l'état algérien ;mais la crise du logement était et est toujours la principale préoccupation qui accompagne des millions de citoyens, en particulier au cours de la dernière décennie, à la suite des changements survenus dans la société à plusieurs égards, et en conséquence, le secteur du logement a connu des problèmes majeurs qui ont accru la complexité de la crise et rendu le citoyen algérien patauge en eux.

Ce problème sévit en Algérie depuis la période d'après la second guerre scientifique, lorsqu'elle a connu une explosion démographique et l'expansion de la communauté sous les effets de l'exode rural, où les bidonvilles ont envahi la ville, cet afflux humain dans les villes a entraîné une saturation rapide du logement qui a surpris les aménagement, qui estimation jusqu'en 1969 que le lotissement que les Européens avaient laissé après l'indépendance

suffisait à absorber l'excédent de population dans les villes, puisque seulement 2,9% étaient alloués à secteur de l'habitation dans le plan triple (1967-1969) de l'investissement global contre 60% alloués au secteur des hydrocarbures (Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociale).

II.2.1.2 Situation économique

L'économie algérienne est considérée comme une économie fragile en raison de sa dépendance au domaine des hydrocarbures, car elle constitue 97% du pétrole et du gaz.

A. Exportations

L'Algérie a une économie ouverte dans laquelle le commerce extérieur représente 46% du PIB (Banque mondiale, 2020). Le gaz naturel et les produits pétroliers représentent la quasi-totalité des exportations. En particulier, les hydrocarbures représentent 94% du volume total des exportations. Selon les dernières données du FMI, le volume des exportations de biens et services n'a augmenté que de 0,8% en 2021 par rapport à 2020, toujours affecté par la baisse des prix du pétrole et les effets de la pandémie de Covid-19. Le FMI prévoit que le volume des exportations rebondira en 2022 (6,6 %), tiré par une demande de gaz plus élevée.

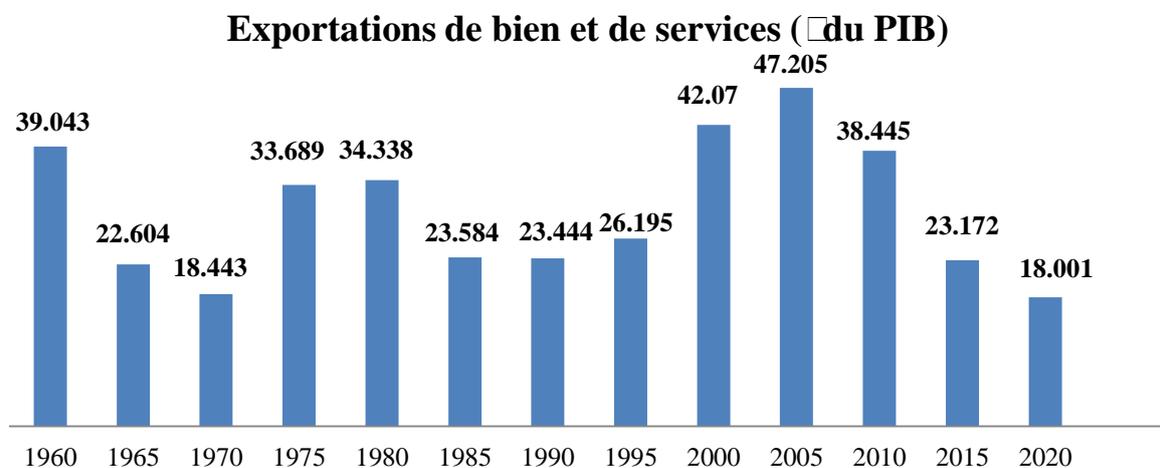


Figure II.5. Exportation de bien et de services (% du PIB) (Banque mondiale, 2021)

Productions et exportation de gaz

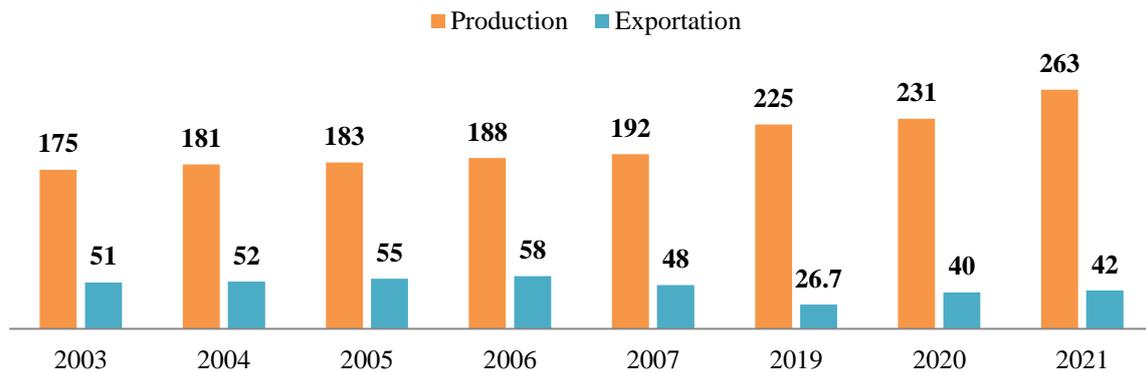


Figure II.6. Production et exportation de gaz

Evolution des exportations des produits pétroliers

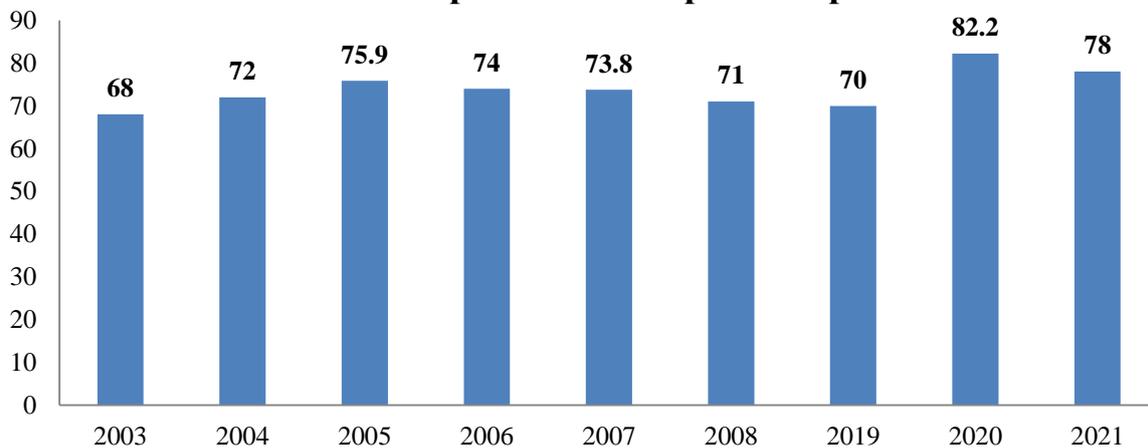


Figure II.7. Evolution des exportations des produits pétroliers

B. Importations

Produits importés par l'Algérie

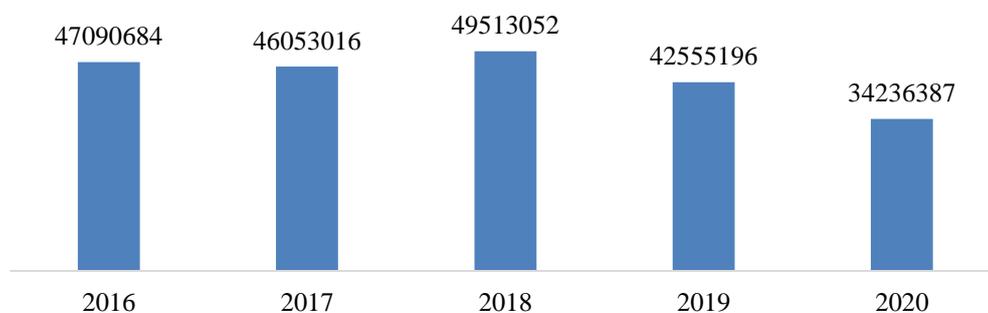


Figure II.8. Produits importés par l'Algérie

C. Balance économique

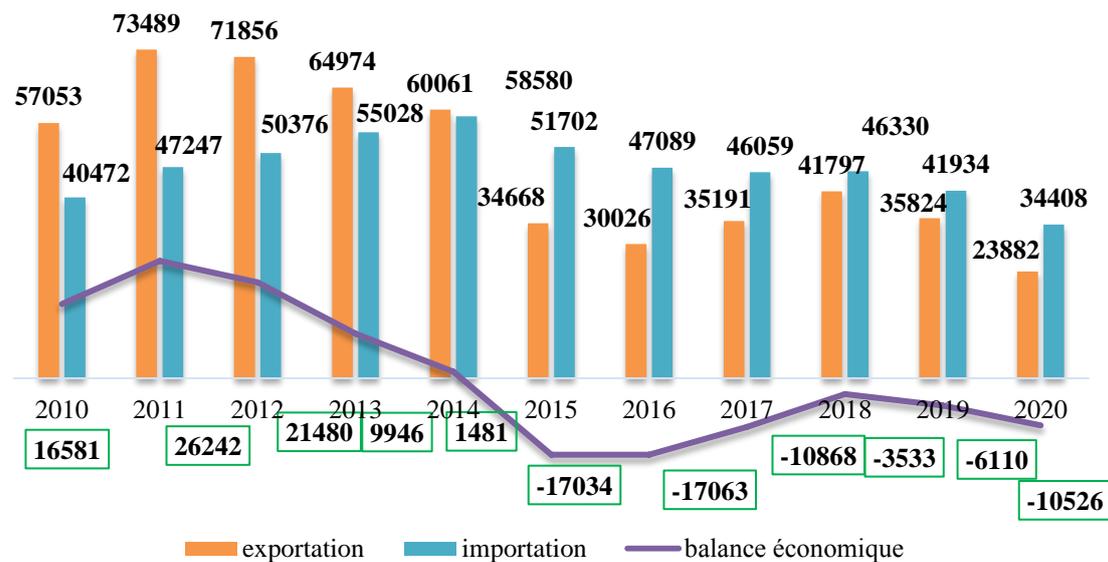


Figure II.9. Balance économique de l'Algérie de 2010 à 2020 (Banque mondiale, 2021)

Conséquence d'une baisse des exportations algériennes plus importante que celle des importations, le déficit de la balance commerciale s'est accentué 72% en 2020, atteignant 10.5Mds USD. Le taux de couverture (exportation/importation) était de 69% contre 85% en 2019.

II.2.1.3 Situation environnementale

A. Inondations

La crue est un phénomène naturel et saisonnier qui correspond à une élévation du niveau des eaux. Elle ne provoque pas de perturbations majeures lorsque son ampleur est modérée. Mais une crue est susceptible de présenter des risques lorsque le débit et le volume d'eau sont tels qu'il y a débordement par rapport au lieu d'écoulement habituel (le lit mineur) : on parle alors d'inondation. L'eau se répand dans les zones d'expansion des crues, qui correspondent au lit majeur du cours d'eau, souvent largement urbanisées. Il est donc très important de bien différencier les notions de crue et d'inondation (Ledoux, 2006).

L'Algérie est confrontée aux phénomènes de crues et inondations, qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et sociale (Lahlah, 2000). Plusieurs régions, de par leur topographie sont menacées par ces catastrophes hydrologiques aussi bien au Nord qu'au Sud (Touaïbia, 2000).

Tableau II.1. Historique d'inondations de l'Algérie 1927 à 2008

Lieu	date	Bilan des dégâts
Mostaganem	11.1927	3000 morts, échelle de gravité 5
Tizi Ouzou	12.10.1971	4ff0 décès, des certaines habitations détruites
Tizi Ouzou	28-31.03.1974	52 décès dans la wilaya, 18000sinistrés, dégâts estimés à 27millons de DA
El-Eulma	01.09.1980	44décès
Annaba	11.11.1982	26 décès, 9500 sinistrés, dégâts matériels importants
Skikda	02.1984	174 maisons démolies, 500 familles sinistrées, terrains agricoles fortement endommagés
Skikda	28-30.12.1984	11décès, immersion de 400 hectares, dégâts évalués alors à 50millons DA
Jijel	29.12.1984	29 décès, 11000 sinistrés
Sidi Bel Abbas	04.10.1986	1 décès, 200 familles sans abri
Bordj Bou Arreridj	23.09.1994	16décès, dégâts (10 millions DA)
Annaba	23-30.04.1996	5décès
Alger Babel Oued	09-11.11.2001	Plus de 700 décès, 115 disparus, des milliers de blessés, dégâts (30 milliards de DA)
Skikda	17.11.2004	Plus de 100 familles sans abri, 219 familles sinistrées, établissements scolaires fermées (3 lycées, 6 collèges d'enseignement moyen et 4 écoles fondamentales)
Sud (Illizi, Adrar et Tamanrasset)	06-09.03.2005	3décès, 9 disparus et 70 évacués par hélicoptère, routes, agriculture et infrastructures endommagées, plusieurs villages inondés
Tindouf	09-11.02.2006	50 à 60□ d'infrastructures détruites aux camps des réfugiés sahraouis (12200 familles sans abri)
Bechar	18.10.2007	2 morts
Ghardaïa	01.10.2008	Plus de 34 décès et 50 blessés, maison effondrées sur leurs habitants, des dizaines de véhicules emportés par les eaux, arbres arrachés, poteaux électriques ensevelis, dégâts aux surfaces agricoles et au cheptel ovin, plus de 1000 maison inondées dont 600 sont endommagées
Bechar	10.10.2008	8 morts, dégâts matériels importants la plus grande inondation depuis 1959

La Figure II.10 Représente une schématisation de la vulnérabilité et de l'aléa d'inondation en Algérie (Merabet, 2008).

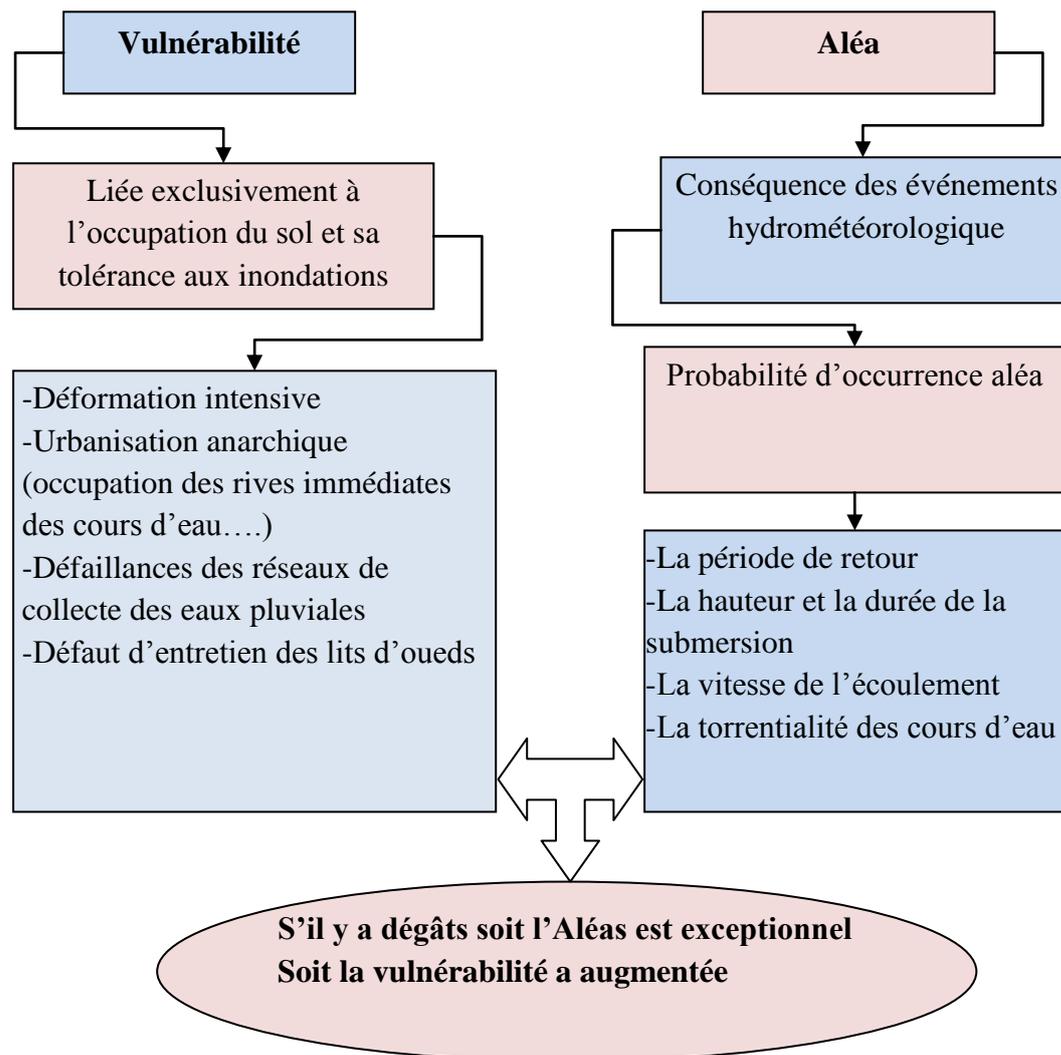


Figure II.10. Schématisation de la vulnérabilité et de l'aléa d'inondation en Algérie

B. Changement Climatique

Le changement climatique est un phénomène qui a fait et fait encore largement parler de lui compte tenu des fluctuations qui touchent le climat terrestre, et leur conséquence sur le mode de vie de l'humanité que ça soit au niveau sanitaire, social, agricole, etc. Ce phénomène tient son importance du fait qu'il touche des secteurs sensibles dont les conséquences peuvent déboucher sur une catastrophe à l'échelle planétaire qui ramène ainsi la question du devenir du genre humain.

L'Algérie est aussi parmi les pays les plus touchés par le phénomène du changement climatique, et a, de tout temps, veillé à lutter contre ce phénomène par ses propres moyens tout en marquant son intérêt en faveur de "l'introduction de nouvelles dispositions constitutionnelles en vue de préserver l'environnement" (Zerouati, 2017).

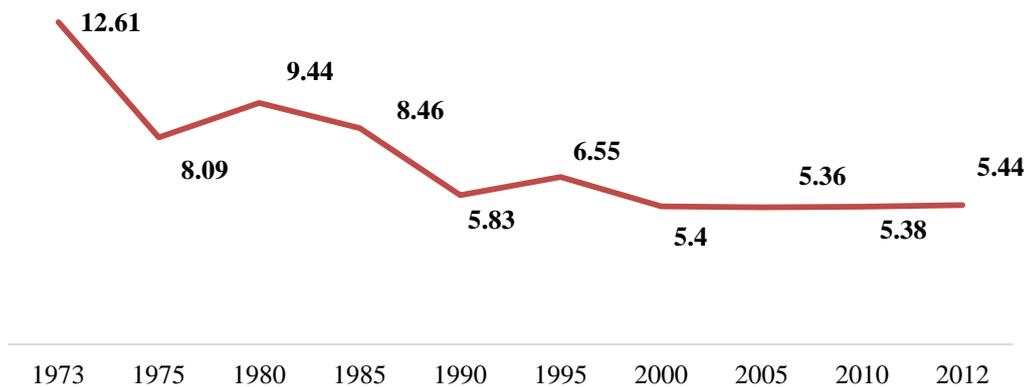


Figure II.11. Gaz à effet de serre par habitation (Perspective monde, 2022)

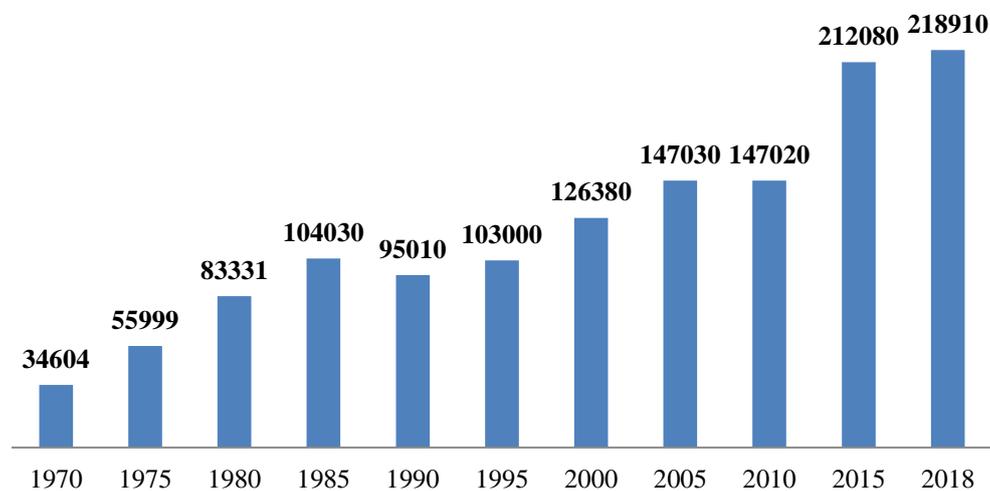


Figure II.12. Emissions totales de gaz à effet de serre (KT e-CO₂) (Perspective monde, 2022)

C. Désertification

La désertification est considérée comme l'une des problématiques environnementales les plus préoccupantes du 21^{ème} siècle. Par désertification, on entend une situation de dégradation des terres, liée au contexte socio-économique de l'utilisation des ressources naturelles au-delà de leur capacité de restauration, aggravée souvent par les fluctuations des conditions climatiques. Elle conduit à un déclin permanent des activités économiques, enracinant les populations locales les plus vulnérables dans la pauvreté et les poussant à un exode massif ([La revue électronique en sciences de l'environnement](#)).

La désertification, en Algérie, concerne essentiellement les steppes des régions arides et semi-arides qui ont toujours été l'espace privilégié de l'élevage ovin extensif. Ces parcours naturels qui jouent un rôle fondamental dans l'économie agricole du pays sont soumis à des

sécheresses récurrentes et à une pression anthropique croissante : surpâturage, exploitation de terres impropres aux cultures... Depuis plus d'une trentaine d'années, ils connaissent une dégradation de plus en plus accentuée de toutes les composantes de l'écosystème (flore, couvert végétal, sol et ses éléments, faune et son habitat). Cette dégradation des terres et la désertification qui en est le stade le plus avancé, se traduisent par la réduction du potentiel biologique et par la rupture des équilibres écologique et socio-économique (Bedrani, 1999).

Pour lutte contre la désertification est une démarche très ambitieuse pour réaliser le mégaprojet du Barrage vert lancé au début des années 1970, projet qui relie les frontières algériennes occidentales aux frontières orientales sur une distance de 1500 km avec une largeur moyenne de 20 km, soit une superficie ainsi réalisée de 3 millions d'hectares de reboisement dont le rendement varie par endroit de 50 à 100%. La consolidation de cette ceinture verte vise à protéger le nord du pays de la désertification en représentant une grande barrière contre l'ensablement et contre l'avancée du désert qui réduit de plus en plus les pâturages des zones steppiques.

II.2.1.4 Situation énergétique

L'énergie en Algérie est l'un des enjeux économiques importants du pays en raison de ses besoins pour gérer la roue économique et assurer les besoins de bien-être des Algériens.

La consommation énergétique nationale a augmenté de 59% entre 2010 et 2019, selon une évaluation réalisée par le Commissariat aux énergies renouvelables et à l'Efficacité énergétique (CEREFÉ, 2022).

Selon le CEREFÉ, la consommation finale d'énergie est passée de 31,6 millions tonnes équivalent pétrole (TEP) en 2010 à 50,4 millions TEP en 2019, soit une augmentation de 18,7 millions TEP par rapport à 2010 (CEREFÉ, 2022).

L'évaluation du CEREFÉ, fait ressortir aussi que le secteur résidentiel et tertiaire vient en tête en matière de consommation finale nationale d'énergie (un total de 177 millions TEP entre 2010 et 2019, soit 43% de la consommation globale), ajoutant que "la consommation par tête d'habitant (en prenant en considération la consommation finale dans le secteur ménages et autres, selon la classification contenue dans les bilans énergétiques du ministère de l'Energie) a évolué de 0,35 TEP/habitant en 2010 à 0,54 TEP/habitant en 2019 (CEREFÉ, 2022).

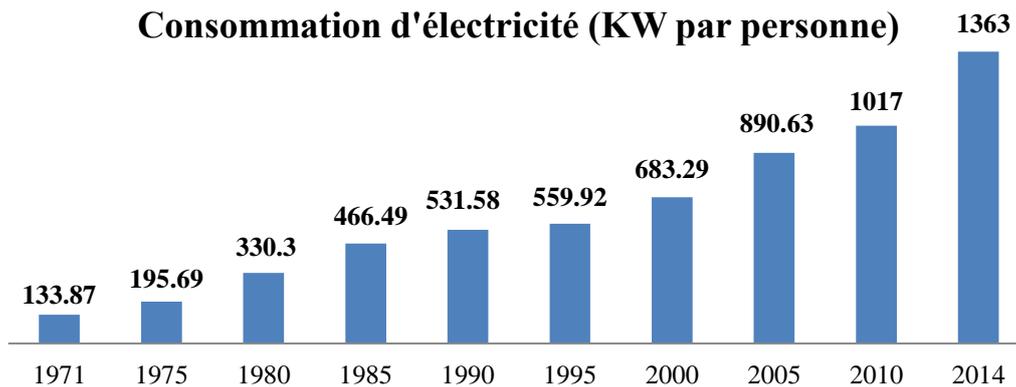


Figure II.13. Consommation d'électricité en Algérie (perspective monde, 2022)

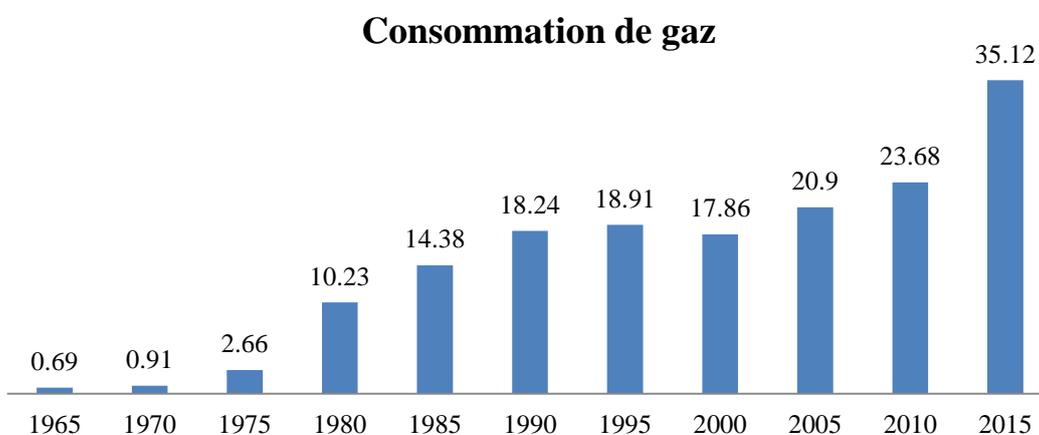


Figure II.14. Consommation de gaz en Algérie (Perspective monde, 2022)

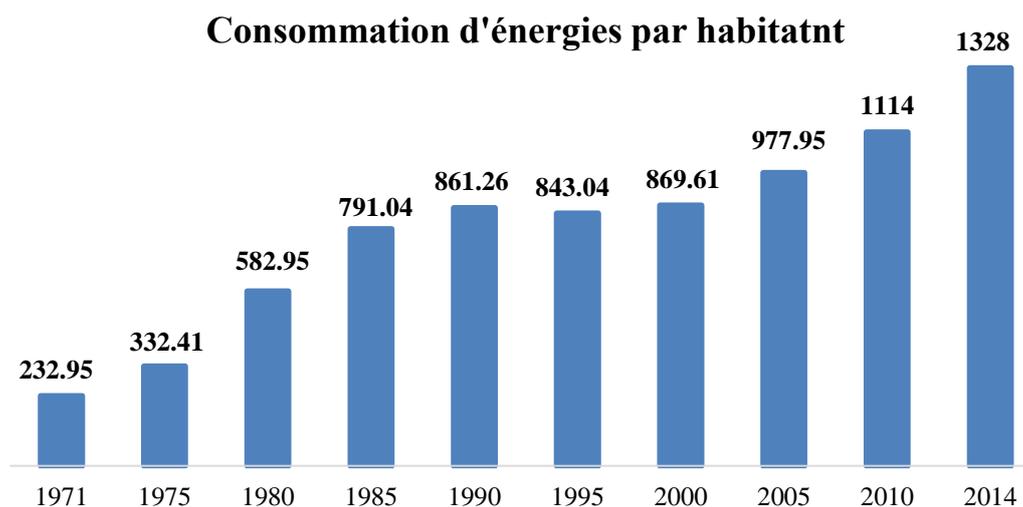


Figure II.15. Consommation d'énergie (Kg de pétrole par habitation équivalence) Algérie (Perspective monde, 2022)

II.2.2 Vulnérabilité sismique du territoire algérien

Si l'on observe une carte de distribution géographique des séismes Figure II.16 on remarque que cette distribution des séismes n'est pas hasardeuse mais elle suit une certaine logique. La majorité des séismes se produisent dans deux régions particulières du globe (Doury, 1997).

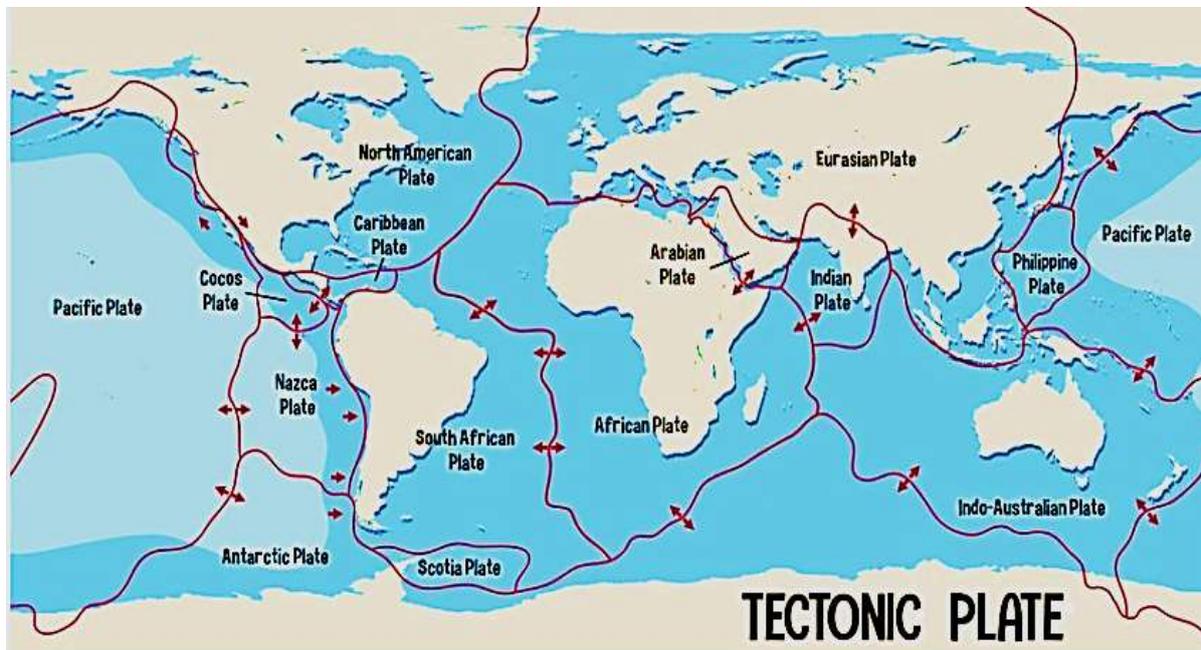


Figure II.16. Carte des plaques tectoniques (Freepik, 2022)

L'Algérie est située sur une limite majeure entre deux plaques tectoniques : la plaque Eurasiennne et la plaque Africaine. La vitesse de raccourcissement entre les deux plaques est estimée entre 5 et 6 mm/an dans la région d'Alger (Cahier Technique AFPS, 2004).

L'affrontement entre les deux plaques a donné naissance notamment à la chaîne de l'Atlas Tellien. Ce massif forme une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur. L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud atlasique : le Nord du pays porte l'empreinte de la tectonique alpine tandis que le Sud formé par la plate-forme saharienne est relativement stable et la tectonique y est moins prononcée (Cahier Technique AFPS, 2004).

II.2.2.1 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 évènements 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'évènements sismiques associée à des concentrations urbaines crée un second niveau de vulnérabilité Figure II.19.

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.

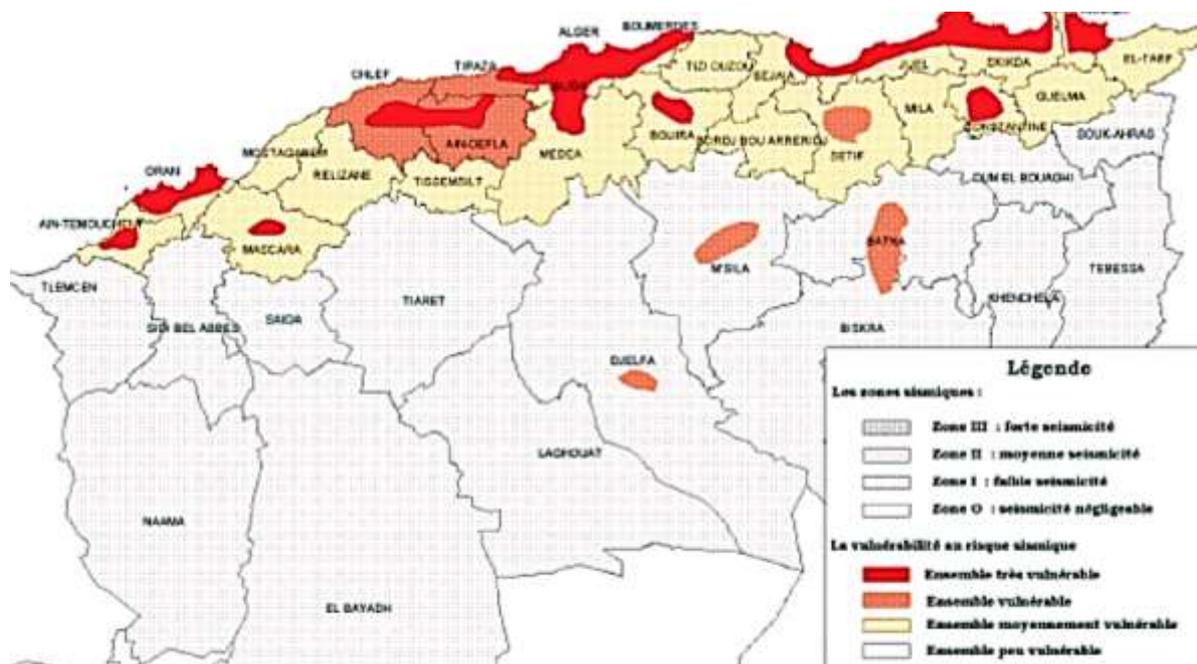


Figure II.17. Zones sismiques et degré de vulnérabilité des territoires en Algérie (MHAT, 2004)

Dans tous les ensembles très vulnérables de la zone tellienne, le risque d'un séisme violent entraînant des effets collatéraux (accidents industriels, raz de marée, ...) est évidemment d'impliquer des pertes économiques graves, mettant en cause aussi bien nos capacités de reconstruction que les performances de notre appareil économique et nos capacités de développement pour un temps plus ou moins long.

II.2.3 Acteurs de la vulnérabilité en Algérie

Le gouvernement algérien a mis en place un ensemble d'organismes et d'institutions qui ont pour mission de maîtriser la vulnérabilité des différents secteurs et de veiller à la gestion des risques encourus. L'organigramme de la Figure II.18 en présente cette structure.

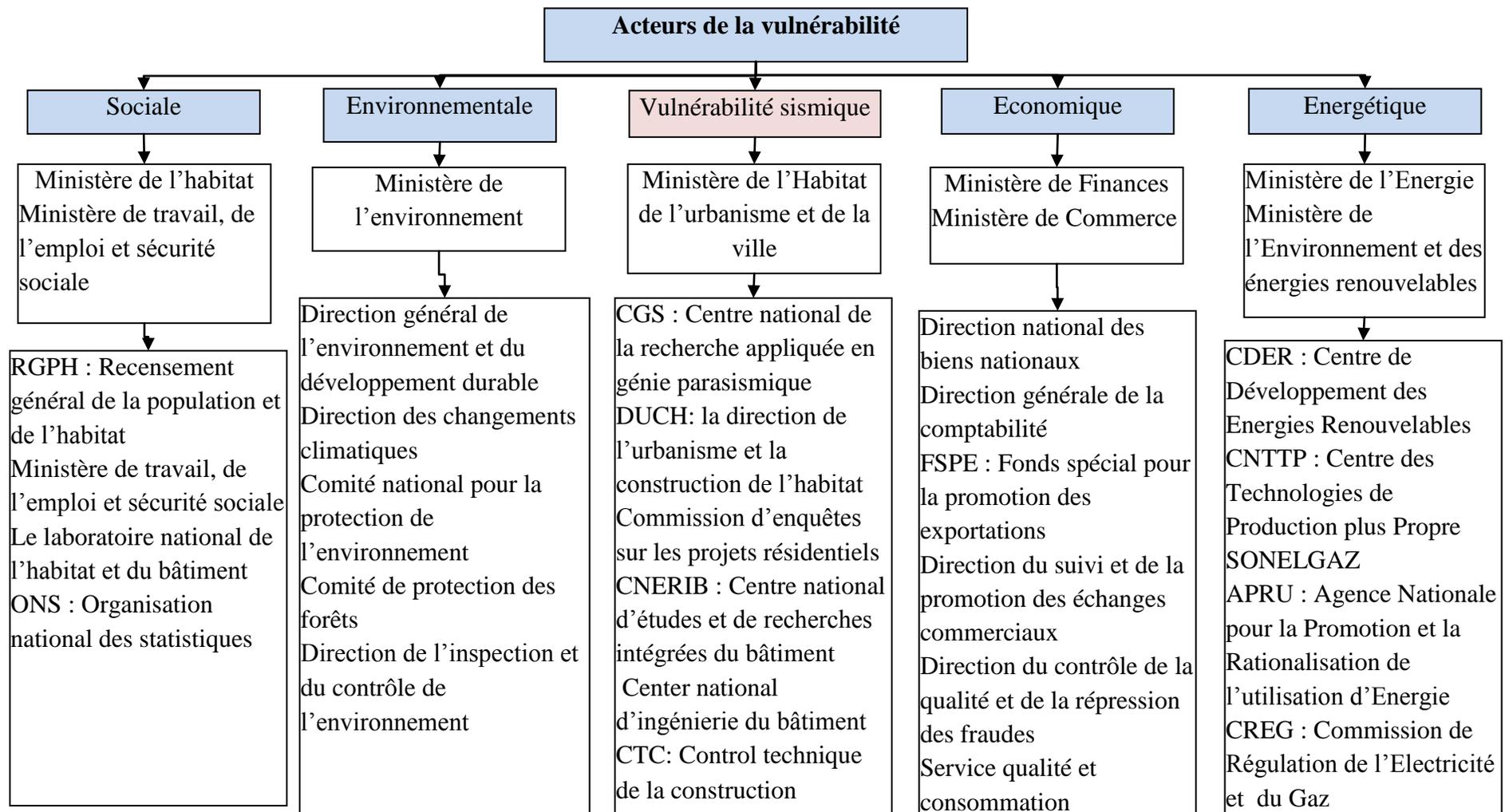


Figure II.18. Acteurs de la vulnérabilité dans différents secteurs en Algérie

II.3 Le secteur résidentiel en Algérie – données et indicateurs

II.3.1 Parc résidentiel algérien : de l'époque colonial à aujourd'hui

II.3.1.1 Le parc résidentiel en Algérie avant 1830

L'expansion urbaine en Algérie remonte depuis la période précoloniale française, où l'Algérie a connu de nombreuses époques coloniale et plusieurs civilisations telles que la civilisation romaine(42avant JC), ottomane(1516), chaque civilisation qui s'est installée dans le pays et a habité ses régions y a laissé ses empreintes et ses traces, elles sont laissé un héritage urbain parmi eux on trouve la CASABA dans la ville d'Alger qui comprend des certaines maisons, de palais et d'anciennes mosquées ottomanes ainsi que dans la ville de Constantine comme palis Hadji Ahmed Bey et palis Mustafa Pacha.

A l'époque des romains, ils s'intéressaient à l'aspect urbain, si bien qu'ils construisirent de nombreux édifices et habitants comme la ville de TIMGAD dans l'EST algérien (Batna).



Constructions ottomanes

Constructions romanes



Figure II.19. Exemple de construction en Algérie avant 1830

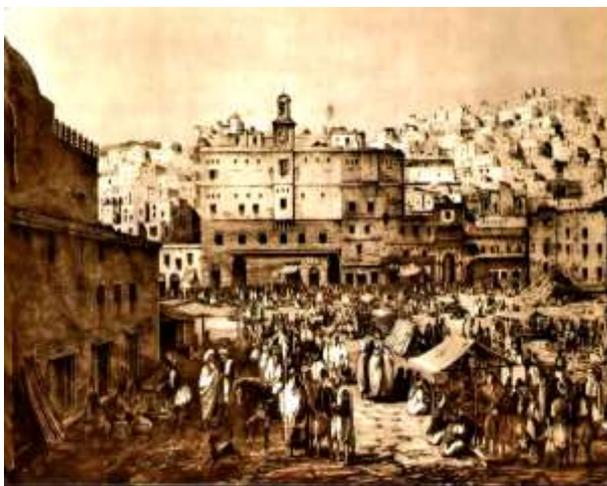
II.3.1.2 Le secteur résidentiel 1830-1962

Dès les premières années de la conquête française dans les années 1830, l'Algérie connaît une frénésie de construction due à l'afflux de migrants donc la présence française à Algérie apporta un changement notable dans paysage architectural des villes, leurs premiers modèles des maisons européennes se trouvent principalement en Alger ville (ville ottomane, la Casbah, ainsi que dans ses faubourgs) (Hadjilah, 2016).

L'Algérie confrontés à une forte crise du logement, due à un déficit ancien de la construction renforcé par l'explosion démographique de l'après- deuxième guerre mondiale. La situation en Algérie ne faisait pas exception par rapport aux villes métropolitaines (Bouchène, 2014).

Depuis les années 1930, l'agglomération s'était étendue sous les effets de l'exode rural et du dynamisme de la natalité. Taudis et bidonvilles avaient envahi la Ville blanche. Pour enrayer leur développement, la municipalité avait, en 1921, créé l'Office public municipal d'habitations à bon marché (HBM) ainsi que la Régie foncière de la ville d'Alger. Ces organismes avaient entrepris la construction de plusieurs ensembles de logements sociaux, la cité Altairac en 1931, celles de Scala en 1935 et Sainte Corinne-Ouchaya (Oued Koriche) en 1937. Près de 10 000 logements furent ainsi construits entre les deux guerres, principalement à Bab-el-Oued et à Sidi-M'hamed (Bouchène, 2014).

en 1954 l'Algérie a connu la première agence d'urbanisme française proposant une méthode de maîtrise de l'urbanisation et l'évolution des paysages et une alternative à l'urbanisme moderniste. La France inaugure en Algérie la formule de ZUP le plan prévoit la construction de 50000 logements par an, 18000 sont livrés en 1958 (Picard, 1994). Cent trente ans de présence française en Algérie ont profondément marqué le pays, surtout le coté urbain.



La place d'Alger le marché et la Djenina



Cité musulmane du Petit Lac à Oran (1954-1959)

Figure II.20. L'Algérie à l'époque coloniale

II.3.1.3 Le secteur résidentiel 1962-2000

Au lendemain de l'indépendance, l'Algérie avait hérité d'une situation socio-économique déplorable. La situation du logement, déjà alarmante, pouvait être une préoccupation majeure,

Le secteur public faible et mal organisé n'était pas capable de prendre en charge à lui seul cette activité qui a connu un déclin favorisé par la conjoncture.

Le parc de logements existant, en grande partie abandonné par les Français devait être occupé par les autochtones et géré d'une manière anarchique. La faiblesse des revenus et l'habitude de la gratuité du logement ancrée dans l'esprit des populations d'origine rurale n'ont pas facilité le recouvrement des loyers qui pouvaient constituer une source de financement de programmes de construction nouveaux.

Comme les préoccupations du moment ne concernaient pas du tout la question du logement, d'autant plus que le parc de logements abandonné était jugé suffisant, on s'est aperçu un peu plus tard qu'on avait entretenu un mythe. Le « mythe des biens vacants » est resté trop longtemps présent dans l'esprit des décideurs, ce qui, déjà au départ, constitue un obstacle au développement du secteur de la construction de logements. La portée réelle du legs colonial en matière de logements s'est avérée beaucoup plus réduite qu'on se l'imaginait Mohamed Bouhaba.

À son indépendance, l'Algérie hérite d'un parc de logements urbain appréciable dont une partie est libérée par les européens suite à leur exode. Des logements « différents » au vu de la diversité des revenus des familles européennes et aussi parce que la ville est composée de quartiers européens et quartiers musulmans chacun ayant sa typologie de logements. Il serait erroné de dire que l'algérien découvre le logement européen en 1962 et que jusqu'à cette date il n'a connu que la maison traditionnelle, le bidonville ou l'habitat horizontal. L'expérimentation du logement européen par substitution s'enclenche dès 1954 et s'accélère entre 1960 et 1966. Les familles musulmanes s'installent progressivement dans les logements des européens qui les quittent pour d'autres plus neufs et plus confortables. 1962 est aussi l'année de la prise de la ville, et il est difficile de savoir combien de familles sont passées directement de la campagne, du bidonville, du camp de regroupement, du douar voire du village aux beaux quartiers des villes et à leurs logements libérés (Zitoun, 2012).

Dans les années 60 et 70, en vue de corriger les dégâts provoqués par des décennies de colonisation et sept ans de guerre de libération, les pouvoirs publics ont réalisé trois projets dans le domaine de l'habitat. Le premier était l'inscription de 1000 villages socialistes dans le premier plan quadriennal (1970-1973) dont 350 ont été réalisés effectivement pour fixer les populations sur place et d'assurer une vie descente pour les paysans et leurs familles. Le

deuxième était la réalisation d’un ensemble d’habitats urbains intégrés. Le troisième était la constitution de réserves foncières communales comme moyens de la politique de l’Etat.

A la fin des années 70, l’exode rural généré par la politique industrielle a accentué la demande de logements surtout dans les centres urbains. Face à cette situation, les pouvoirs publics algériens ont pris des résolutions pour répondre à cette crise. La création du ministère de l’habitat, d’urbanisme et de la construction en 1977 est une manière de prouver encore une fois que l’Etat porte un intérêt particulier à ce secteur. Par conséquent, une nouvelle politique qui vise à développer et à diversifier les segments d’offre de logement, a été mise en place.

Avant 1978, par conséquence d’une politique d’investissement peu soutenu du secteur, le taux de croissance de logement n’était que de 0,5% tandis que le taux de croissance de la population était de 3%. De ce fait, le déficit commençait à se creuser. Une plus grande priorité à l’habitat est alors accordée par les pouvoirs publics, conduisant à une amélioration relativement importante du nombre de livraisons (une moyenne de 70 000 par an) durant la décennie qui a suivi. Jusqu’aux années 1980, la production du logement dépendait des ressources financières et matérielles de l’Etat. La Figure II.23 synthétise l’évolution du parc logement depuis l’indépendance jusqu’à 1990. La moyenne de cette évolution était de 32 800 par an (Taleb et Suidi, 2017).

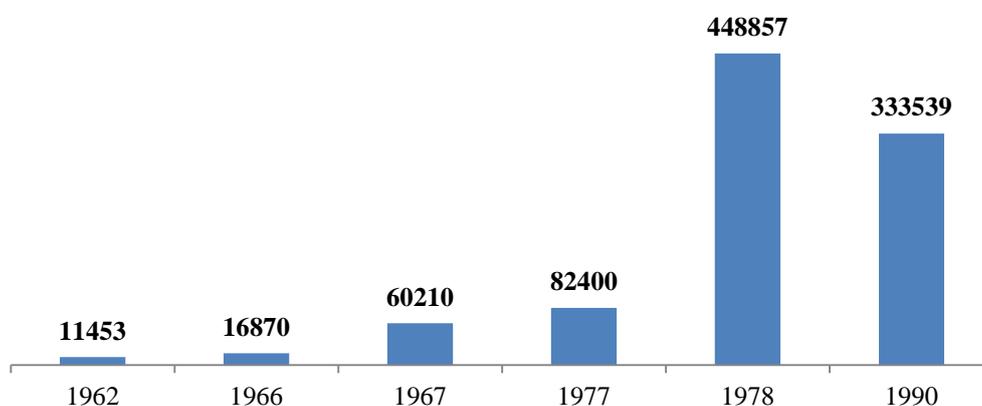


Figure II.21. Evolution de parc de logement de 1962 à 1990

La réorientation libérale des politiques d’habitat après 1990, cette période est nommée « la nouvelle politique de l’habitat après 1990 ». Dans cette phase, le secteur de l’habitat a été caractérisé par d’énormes bouleversements politico-économiques (libéralisme, privatisation, etc.), la participation d’acteurs-promoteurs publics et privés (OPGI, agence foncière, promoteurs immobiliers) et l’apparition de nouvelles procédures d’acquisition (logement social participatif, logement promotionnel, location-vente, etc.) (Taleb et Suidi, 2017).

De plus, des directives sont adoptées pour encourager la production de terrains à bâtir. Celle-ci est pensée comme le moyen de réduire le déficit de logements dont souffre l'Algérie depuis la fin des années 1960, déficit évalué à 2 millions d'unités. Cette relance va mobiliser les directions centrales du ministère de l'habitat (en particulier la direction de l'architecture et de l'urbanisme), les directions et services locaux de ce même ministère, les OPGI, les services techniques des wilayas et des communes. Une rupture est marquée avec le modèle de développement socialiste et la distinction des terres urbanisées et urbanisables du reste des terres par l'instauration de plusieurs lois (La loi N°90-25 du 18/11/1990, La loi N°90-29 du 01/12/1990 et la loi domaniale N° 90-30 de 1990), ce nouveau cadre juridique a eu comme conséquence d'encourager l'intervention des opérateurs privés et des particuliers dans les investissements du secteur de l'habitat. La politique de l'habitat social est apparue après 1994 dans le cadre du programme d'ajustement structurel. Dans le cadre de la gestion de la nouvelle formule d'aide directe au logement (aides à l'accès à la propriété), il y a eu recours à la caisse nationale du logement à partir de 1994. Cette aide directe, dont le montant et les critères d'attributions sont fixés par des textes juridiques, constitue le pivot du nouveau dispositif du financement du logement social. Cette période a été caractérisée principalement par l'encouragement du logement social et de l'initiative privée (Taleb et Suidi, 2017).

La décennie 90, malgré un contexte économique et sécuritaire gravement détériorés en début de période, verra la réalisation de plus de 675 000 logements (pour une moyenne annuelle de 85 000 unités livrées), dont moins d'un tiers au milieu rural. Le milieu rural a particulièrement souffert de la situation sécuritaire au cours de la décennie noire (10 000 logement en moyenne). Après 1999, une nouvelle stratégie a mis en place des mesures qui visent l'augmentation et la diversification des terrains à bâtir par les différents segments de la population ainsi que le développement de la production de logement par la définition d'une réforme institutionnelle du financement et des mesures d'accompagnement (Taleb et Suidi, 2017).

Le secteur de l'habitat est considéré comme un élément central au cœur des enjeux socio-économiques, il est aussi un facteur de développement humain. L'intérêt porté pour ce secteur est une conséquence de la croissance démographique effrénée à partir de l'indépendance jusqu'aux années 80, de l'exode rural massif et une urbanisation accélérée et non contrôlée. L'inscription du secteur de l'habitat dans une logique sociale, revient à deux raisons : le fait que le logement est considéré comme un besoin primaire chez les individus, ajouté à cela l'adoption d'une politique volontariste par les pouvoirs publics algériens ou l'Etat était le

principal entrepreneur, depuis l'indépendance jusqu'à la fin des années 80. Malgré le recul du rôle de l'Etat durant la période d'après la crise de 1986 et la décennie noire, l'Etat revient à nouveau. Après 2000, il s'est lancé dans une politique où il a garanti la prise en charge du financement du logement social à travers ses différents programmes (Taleb et Suidi, 2017).

II.3.1.4 Le secteur résidentiel 2000-2020

Dans le cadre de la stratégie gouvernementale pour le développement du secteur de l'habitat, l'Etat a accentué ses efforts pour améliorer le niveau de vie des populations à travers une batterie de lois concernant: le développement et la promotion du foncier et du logement, les aides pour l'accès à la propriété de l'habitat, et les réformes institutionnelles du financement du logement individuel. Plusieurs plans d'action ont été mis en application dans le cadre des divers quinquennats (Taleb et Suidi, 2017).

A partir de 1999, un effort considérable d'injection de ressources budgétaires est consenti. Le financement du logement a toujours fait l'objet d'une prise en charge majoritaire par l'Etat. En général, trois types d'interventions sont opérés: la construction de logements sociaux, la bonification de taux d'intérêt et des subventions sur le foncier (Taleb et Suidi, 2017).

La décennie 2000, à l'instar des autres segments du champ social, est marquée par une politique de rattrapage des déficits accumulés lors des années précédentes, mobilisant des ressources appréciables, notamment avec le programme du plan quinquennal 2005/2009 qui a retenu la réalisation d'un million de logements. Sur cette décennie, la variation a été de près de 170 000 logements nouveaux par an. En 2008, le parc du logement était de 6 748 000 logt. De l'indépendance jusqu'à 2008, le parc de logement a été multiplié par 3,5. Le taux d'occupation de logement TOL en 2008 mesuré par rapport aux logements occupés était de 6,7, en prenant en compte des logements inoccupés, le TOL était de 5,2 personnes par logement (Taleb et Suidi, 2017).

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 (Figure II.22. Figure II.23).

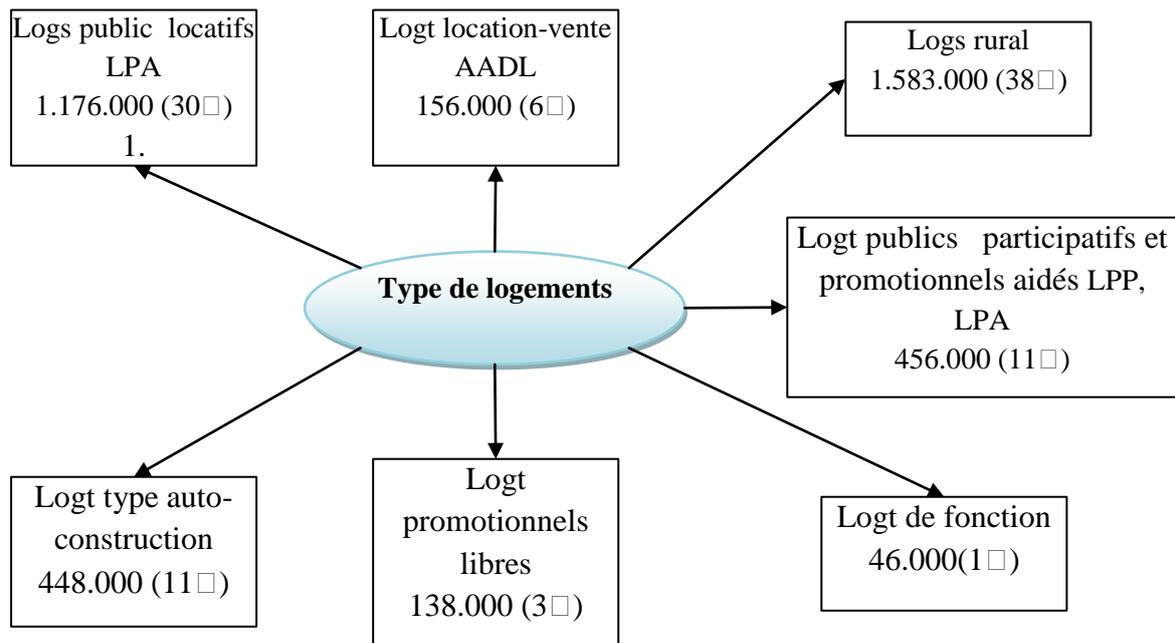


Figure II.22. Distribution de logement en fonction de leur type 1999-2018

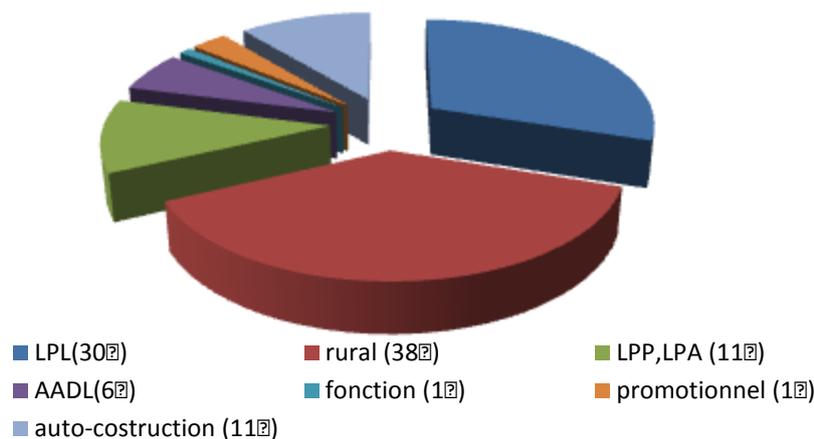


Figure II.23. Distribution de logement en fonction de leur type 1999-2018

II.3.1.5 Programme de logements 2020-2030

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.

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.

L'Etat algérien projette de maintenir la cadence de réalisation des logements à l'horizon 2030 avec le même rythme des années précédentes. Dans un plan présenté, par le ministre de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, Monsieur Kamel Nasri a déclaré : "L'Etat projette l'intensification de la production de logements par une mobilisation et une orientation efficace des ressources financières, la finalisation du programme en cours, l'engagement d'un nouveau programme de un (1) million de logements pour la période 2020-2024, tous segments confondus et la livraison à l'horizon 2024 de 1,5 million de logement".

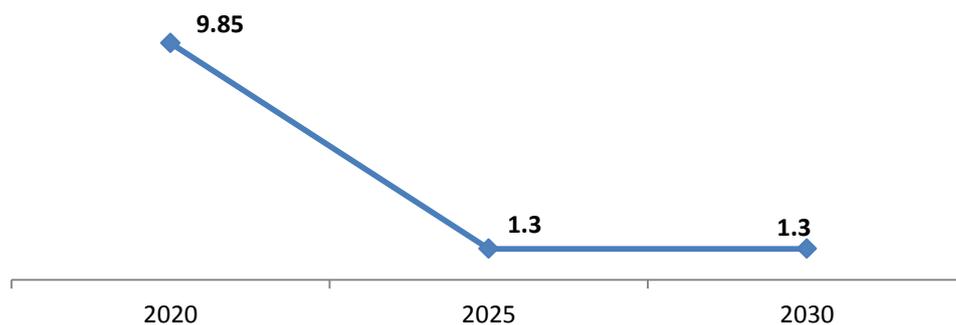


Figure II.24. Le parc résidentiel en Algérie à l'horizon 2030 (ONS, 2022)

II.3.2 Structure et distribution de l'habitation en Algérie

II.3.2.1 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.

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

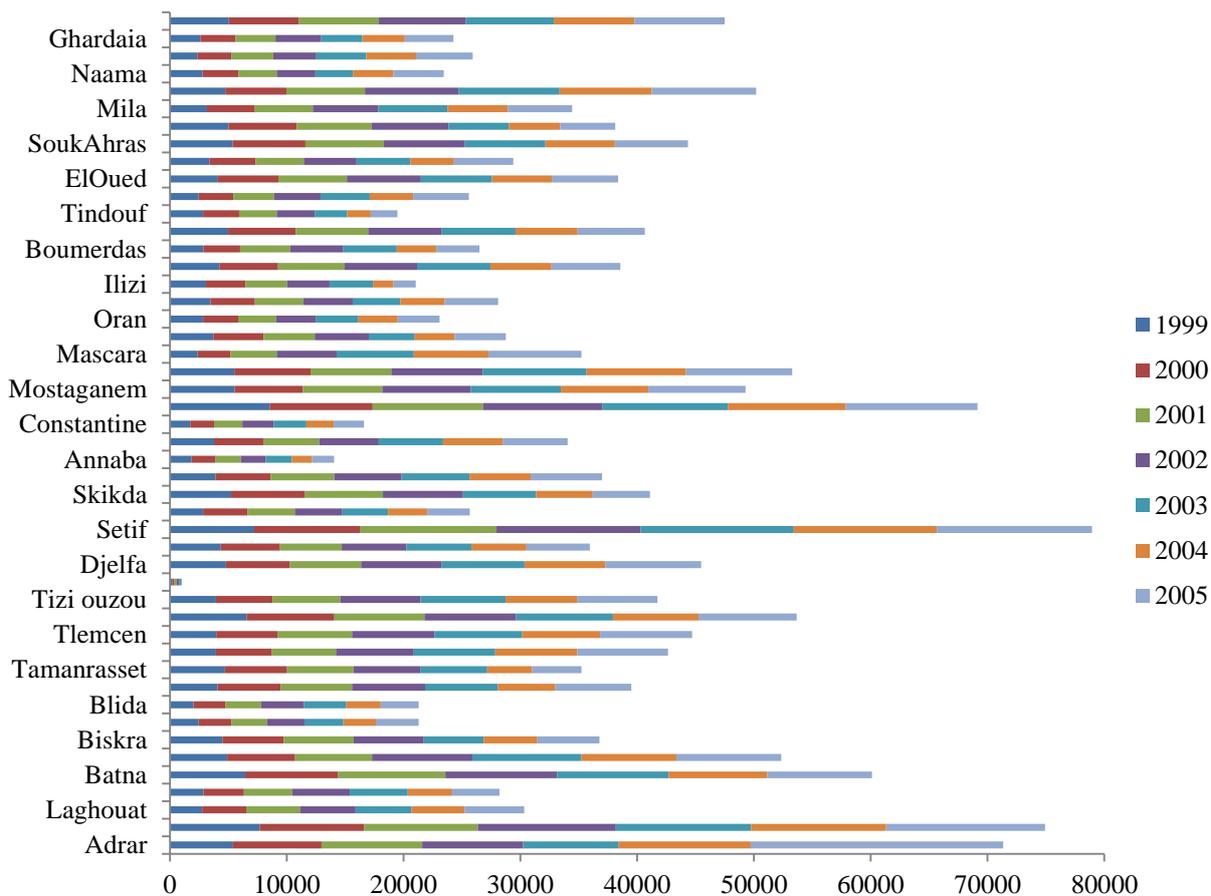


Figure II.25. Habitat rural : Répartition des logements inscrits et des livraisons par Wilaya 1999 à 2005(ONS, 2022)

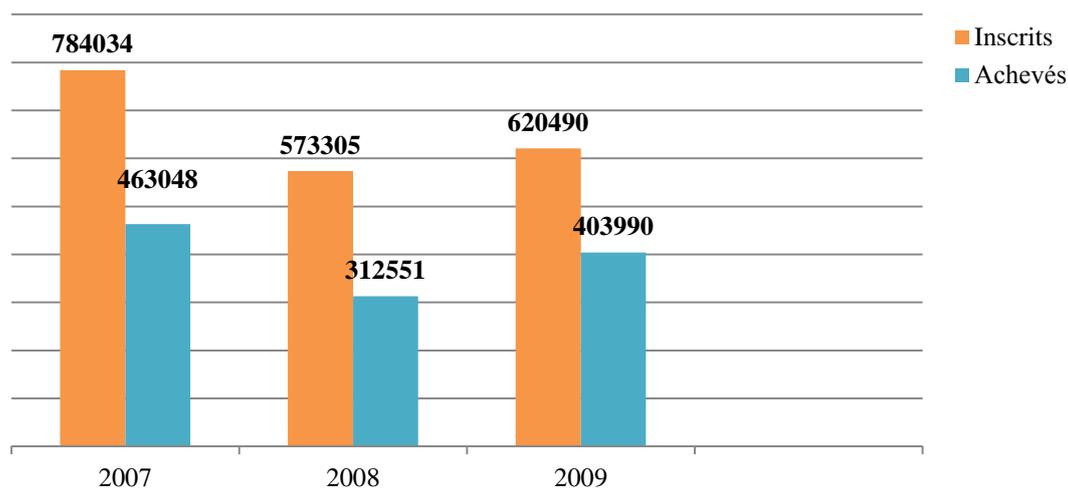


Figure II.26.Habitat rural : Répartition des logements inscrits et des livraisons par Wilaya 2007 à2009 (ONS, 2022)

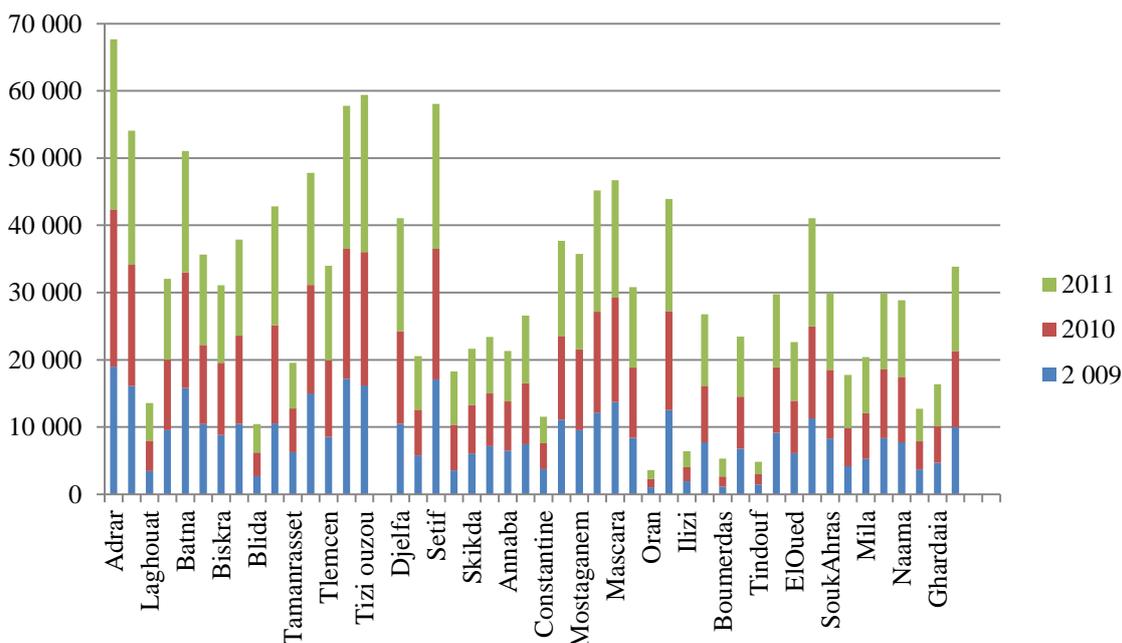


Figure II.27. Habitat rural : Répartition des logements inscrits et des livraisons par wilaya - Tous programmes confondus de 2009 à 2011 (Source: Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville)

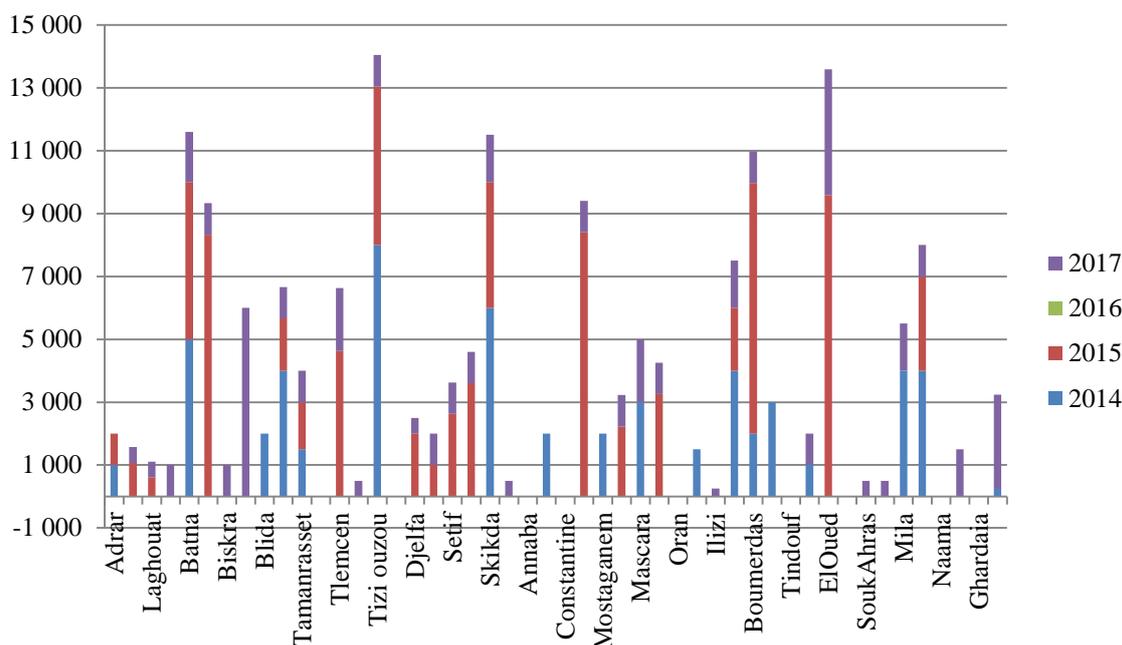


Figure II.28. Habitat rural : Répartition des logements ruraux inscrits par Wilaya (Hors auto-construction) -Tous programmes confondus- Années 2014 à 2017 (Source: Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville)

II.3.2.2 Habitat Urbain

Depuis les années 90 sous la pression exacerbée de la crise du logement, les gestionnaires algériens ont eu recours à ce type d’urbanisme dit « fonctionnaliste » qui permettait d’apporter des solutions rapides grâce aux procédés de standardisation et de préfabrication. Il s’en est suivi l’émergence des zones d’habitat urbain nouvelles « Z.H.U.N » dans les villes algériennes qui connaissent actuellement d’énormes dysfonctionnements symboles de nuisance et de délabrement (Naceur et Farhi, 2003).

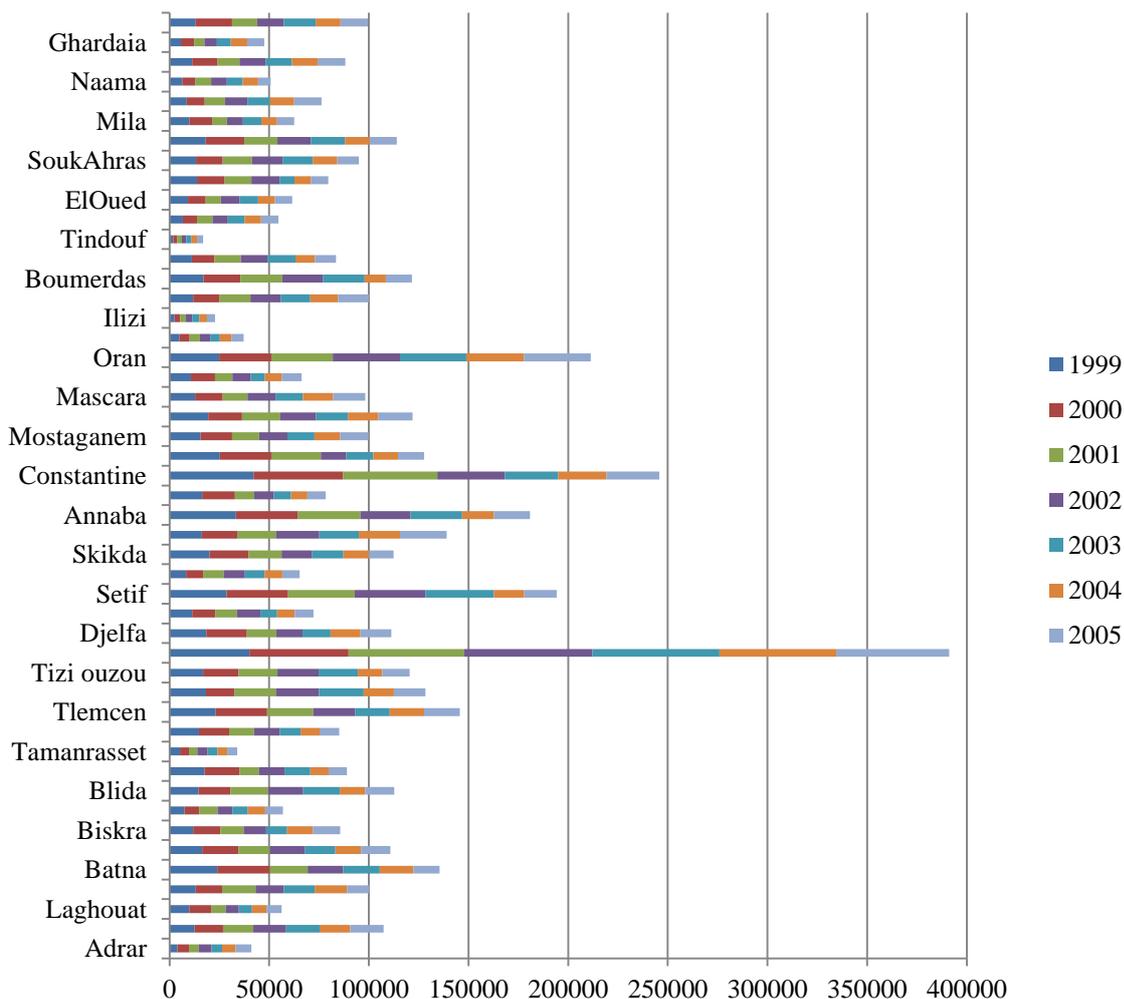


Figure II.29. Habitat Urbain : Répartition des logements et des livraisons par Wilaya 1999 à 2005 (Source: Ministère de l’habitat, de l’urbanisme et de la ville)

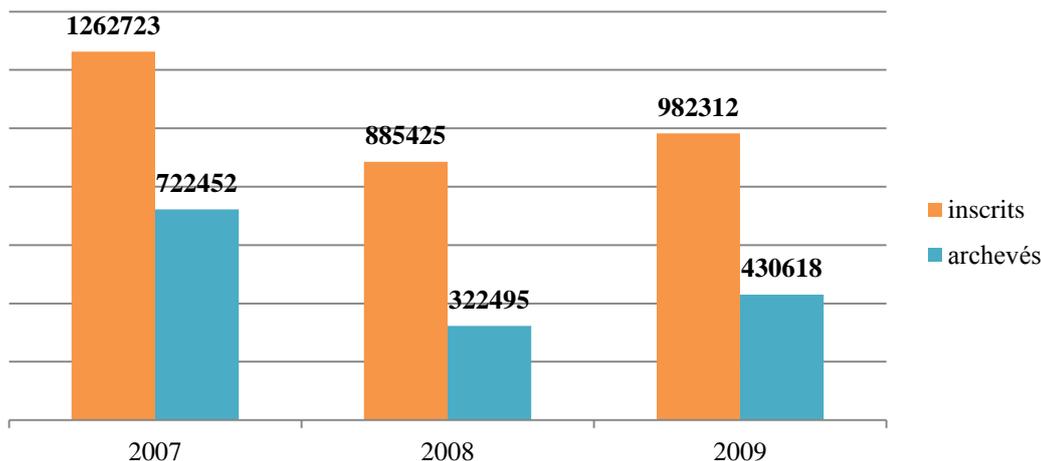


Figure II.30. Habitat Urbain: Répartition des logements inscrits (inscriptions cumulées) et des livraisons (achèvements cumulés) par Wilaya - Tous programmes confondus - Années 2007 à 2009 (Source: Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville)

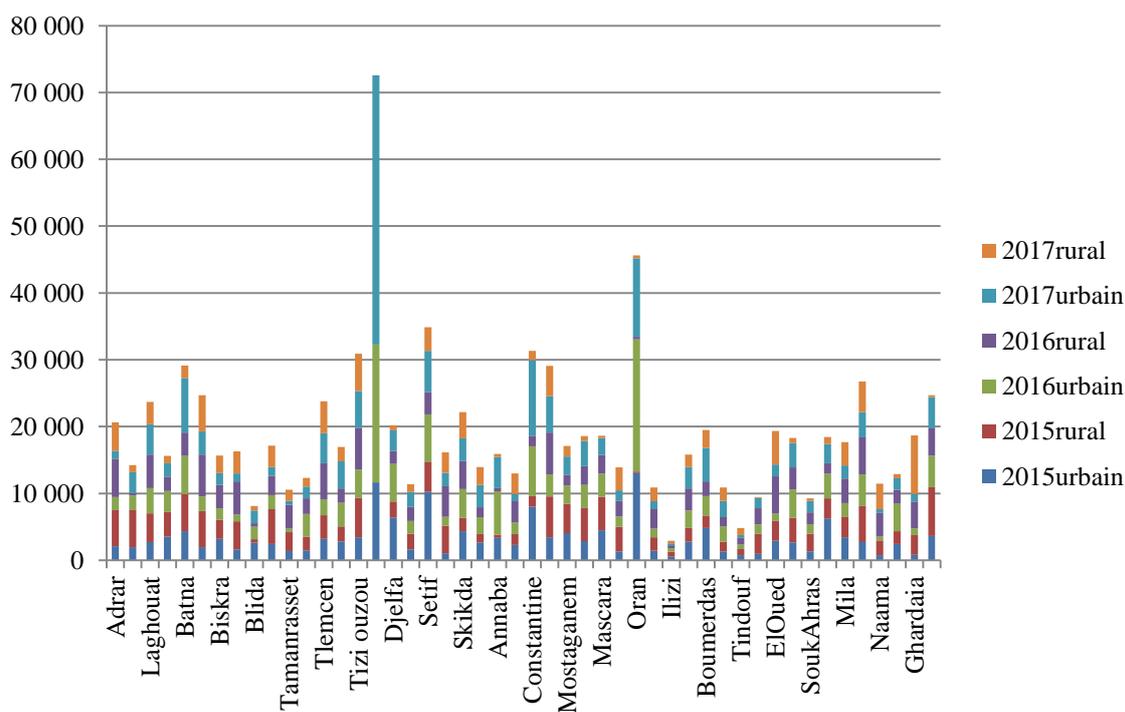


Figure II.31. Répartition des logements urbain et rural livrés par wilaya (hors auto construction) Tous programmes confondus de 2015 à 2017 (Source: Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville)

II.3.3 Etat des constructions du parc résidentiel

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 distingués dans le tableau suivant :

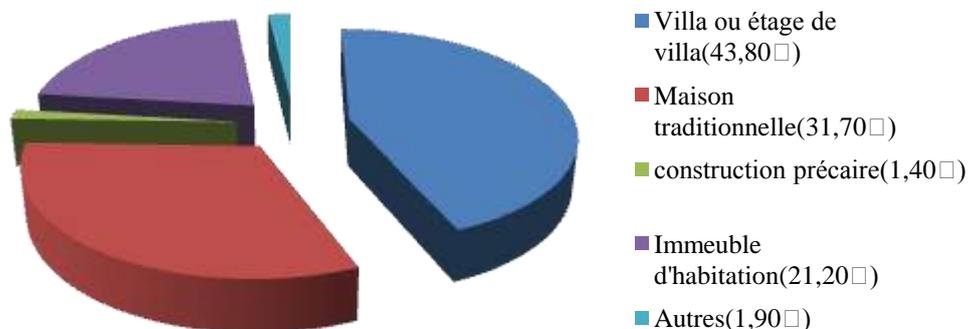


Figure II.32. Type de construction résidentiel en Algérie (ONS, 2014)

II.3.4 Gouvernance du secteur

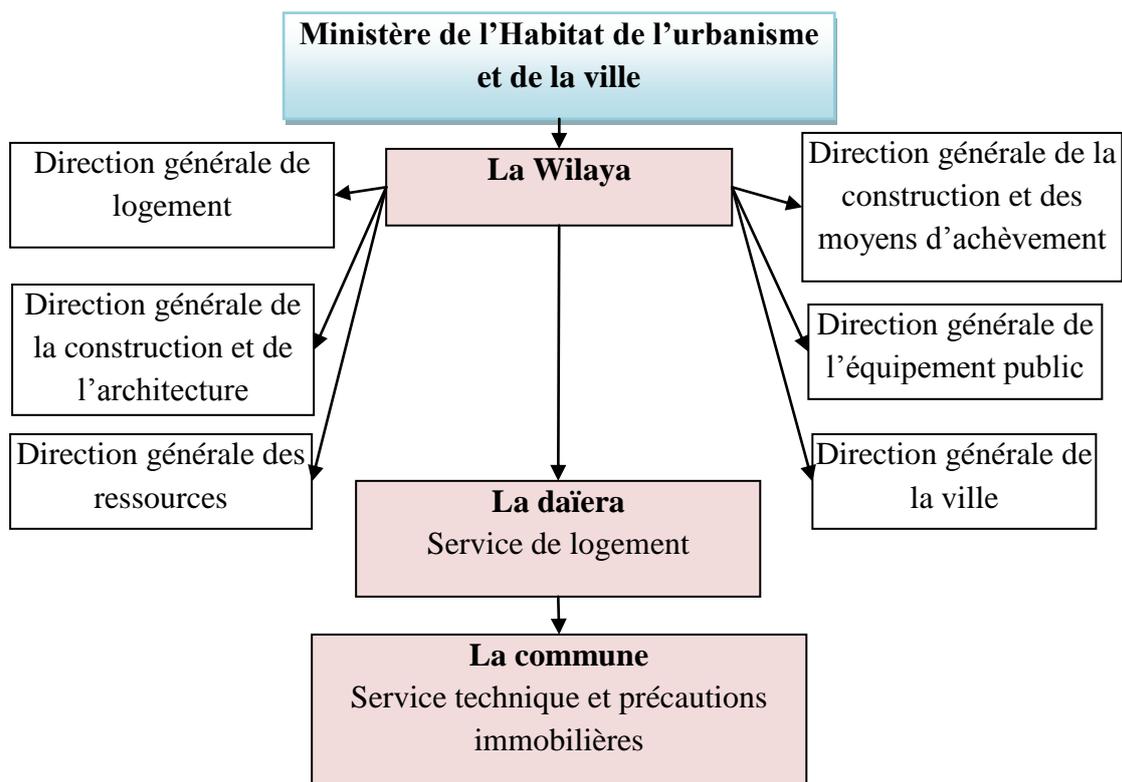


Figure II.33. Gouvernance de secteur résidentiel en Algérie

II.4 Problématique de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation en Algérie

II.4.1 Historique de la sismicité

Historiquement, l'Algérie est connue pour être une zone sismique très active et dans ces dernières décennies, plusieurs catalogues sont publiés sur l'histoire sismique du nord algérien (Rothé, 1950 ; Benhallou et al., 1971 ; Roussel, 1973; Ambraseys et Vogt, 1988 ; Mokraneetal, 1994 ; Benouar, 1994, Boudiaf, 1996).

L'Algérie du Nord est frappée régulièrement par des séismes parfois importants mais souvent modérés ou faibles. Les séismes modérés ou forts génèrent bien souvent des catastrophes difficiles à surmonter car notre pays, à l'instar de beaucoup d'autres, reste encore mal préparé pour affronter de tels cataclysmes.

L'historique de l'activité sismique en Algérie du Nord est connu 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).

L'Algérie du Nord a été victime de nombreux séismes qui sont majoritairement des séismes en faille inverse en accord avec le mouvement général de compression à la frontière des plaques tectoniques Eurasie et Afrique. Le dernier tremblement de terre majeur en Algérie date du 10 octobre 1980. De magnitude 7, 1, celui-ci avait frappé la région d'EI Asnam (Chlef). La ville avait été sévèrement touchée et comptait près de 5000 morts. En 1954 la même ville avait été meurtrie par un séisme de magnitude 6,4 qui avait fait plus de 1000 morts (AFPS, 2004).

Et plusieurs séismes de magnitude comprise entre 5 et 6 se sont produits à l'Ouest d'Alger dans les régions de Cherchell, Tipaza et Medea en 1988, 1989 (70 morts-150 000 sans abris), 1990et 1996. Tous ces séismes ont été largement ressentis à Alger (AFPS, 2004).

Le Tableau II.1 montre que l'Algérie a connu de nombreux séismes destructeurs.

Tableau II.2.Séismes majeurs en Algérie de 419 à 2022

Séisme	Date	Magn.	Int.	Effond.	Morts	Blessés	Pertes économique
Sétif	419	/	X	/	Plusieurs	Plusieurs	/
Ain-Temouchent	699	/	X	/	Plusieurs	Plusieurs	/
Alger	03.01.1365	forte	forte	/	Plusieurs	Plusieurs	/
Oran	09.10.1790	6.5-7.5	X	/	2000	/	/
Blida	02.03.1825	7.5	X	/	7000	/	/
El Kalaa	29.11.1887	4-5	X	/	20	/	/
Gouraya	15.01.1891	7.5	X	/	28	/	/
Constantine	04.08.1908	6.25	VIII	/	12	/	1.716.927
The Aumale	24.06.1910	6.6	VIII	/	81	/	24.129.270
Mac-Mahan	16.03.1924	5.35	VIII	/	4	/	/
Bordj Abou Hassan	25.08.1925	5.4	VIII	50	4	/	/
Inkerman Chlef	24.08.1928	5.4	VIII	100	4	/	272.202
Carnot	07.09.1934	5.1	VII	100	0	/	/
Guelma	10.02.1937	5.2	VIII	/	2	11	3.170.176
Mansoura	16.04.1943	5.3	VIII	250	9	16	/
Mont Honda	12.02.1946	5.55	VIII	1000	277	11	60.773.589
Constantine	06.08.1947	5.0	VIII	50	3	118	26.571.412
Kheratta	17.02.1949	4.75	VII	50	2	16	18.334.846
Chlef	09.09.1954	6.7	X	2000	1243	5000	52.866.245
Bou medfaa	07.11.1959	5.3	VIII	100	0	2	5.457.943
Béjaia	12.02.1960	5.6	VIII	1000	264	112	/
Msila	01.01.1965	5.45	VIII	3145	5	25	15.048.698
Msila Melouza	21.02.1969	5.0	VIII	600	47	129	8.778.887
Bordj Bou Arreridj	24.11.1973	5.1	VII	2000	4	43	/
Chlef	10.10.1980	7.1	X	60000	2633	8369	14.957.383.49 5
Constantine	27.10.1985	5.8	VIII	/	10	300	2.202.760
El affroun	31.10.1988	5.4	VII	/	0	5	/
Dj- Chenoua	29.10.1989	6	VIII	8000	35	700	9.557.137

Tableau II.3.Séismes majeurs en Algérie de 419 à 2022 (Suite)

Séisme	Date	Magn.	Int.	Effond.	Morts	Blessés	Pertes économique
Mascara	18.08.1994	5.9	VII	2806	172	295	204.711.039
Alger	04.09.1996	5.7	VII	/	0	0	/
Ain timouchent	22.12.1999	5.8	VII	2708	26	174	160.534.203
Beni Ourtilane	10.11.2000	5.4	VII	3000	2	50	33.033.728
Boumerdas	21.05.2003	6,7	X	30000	2266	11500	6.440.679.348
Oran	06.06.2008	5.5	VIII	/	1	/	/
Msila	14.05.2010	5.3	VIII	4	3	43	/
Bouira	14.05.2010	5.3	VIII	/	2	10	/
Alger	01.08.2014	5.6	VIII	/	6	2	/
Mihoub	28.05.2016	5.4	VIII	62	0	29	26.799.482
Alger	05.03.2017	4.6	VII	/	/	/	/
Blida	0.2.01.2018	5.0	VIII	/	/	/	/
Ain timouchent	18.10.2019	4.0	VII	/	/	/	/
Skikda	22.11.2020	5.2	VIII	5	0	0	/
Mila	17.08.2020	4.9	VII	3	0	0	/
Béjaia	18.03.2021	5.9	VIII	3	0	12	/
Bouira	08.03.2022	3.9	V	/	0	0	/
Béjaia	19.03.2022	5.5	VII	23	0	9	/

II.4.2 Problématique de la vulnérabilité du secteur

Le nord de l'Algérie est caractérisé par une activité sismique très importante. Presque chaque année, des tremblements de terre sont suffisamment forts pour être ressentis par la population et régulièrement, certains d'entre eux provoquent des dégâts significatifs, et tout récemment le séisme de Boumerdas 2003 a montré la vulnérabilité de nos villes vis-à-vis de l'action sismique.

Dans cette région, se situent les plus grandes villes d'Algérie « Alger, Annaba, Constantine, Oran etc.. » et concentrent les plus grandes infrastructures sociales économique et politique ainsi que la quasi-totalité de la population. De nombreuses zones fortement urbanisées, quartiers récents ou centres urbaines anciens surpeuplés, sont sujet au risque sismique

Les villes en Algérie sont constituées en grande partie de constructions datant de l'époque coloniale.

Le parc immobilier hérité de l'ère coloniale qui représente une grande part des constructions existantes dans les grandes villes ne cesse de se dégrader. Au plan quantitatif et de l'ancienneté des ouvrages au niveau national, il est dénombré :

- 850 000 logements datant d'avant 1830
- 950 000 logements construits entre 1945 et 1954
- 148 000 logements réalisés entre 1954 et 1962

L'importance du bâti existant, son vieillissement, le risque sismique auquel il est exposé, le déficit en logements, nous oblige à lui assurer une priorité; qui nécessite une attention particulière et une politique de prise en charge de tout le patrimoine national. Car le laisser se dégrader correspond à une perte économique évidente.

Le phénomène de dégradation du vieux bâti, s'est développé en raison de l'intervention de multiples facteurs. Ces derniers se divisent en deux catégories bien distinctes l'une de l'autre mais les conséquences se rejoignent et aboutissent à l'état de vétusté du patrimoine tel qu'il se présente aujourd'hui :

- Le vieillissement naturel (origine des matériaux, environnement, etc.).
- Le vieillissement accéléré (absence d'entretien, transformations illicites, etc.).

Actuellement, le problème de la vulnérabilité sismique du cadre bâti ancien fait partie de notre quotidien, et les actions temporaires ne peuvent ramener des solutions durables. En outre, la vulnérabilité du vieux bâti à l'aléa sismique est préoccupante. La question qui se pose aujourd'hui est de savoir quelle est la résistance réelle du vieux bâti à la sollicitation d'un aléa sismique et de déterminer à quel niveau de risque il doit pouvoir résister.

De nouvelles démarches et attitudes doivent être adoptées vis-à-vis de l'acte de bâtir:

- Il faut reconsidérer l'acte de bâtir à tous les niveaux, décision, conception, réalisation, utilisation et gestion.
- Le logement ou l'équipement n'est pas un produit à consommer, mais un investissement qu'il faut bien gérer dans le temps.

La question n'est pas de s'engager dans une politique de table rase, mais au contraire de prendre en compte un patrimoine dans sa dimension urbaine, sociale et économique. En effet, une partie de l'existant a vieilli et ou ne répond plus aux exigences parasismiques actuelles et mérite d'être requalifiée et renouvelée.

La tâche est considérable, compte tenu de la diversité des matériaux utilisés, de la variété des modes de constructions et des interactions éventuelles entre le sol et la structure ou entre structures.

Le grand nombre de bâtiments construits avant l'introduction des normes parasismiques représente un risque sismique élevé.

II.4.3 Acteurs de la vulnérabilité dans le secteur résidentiel

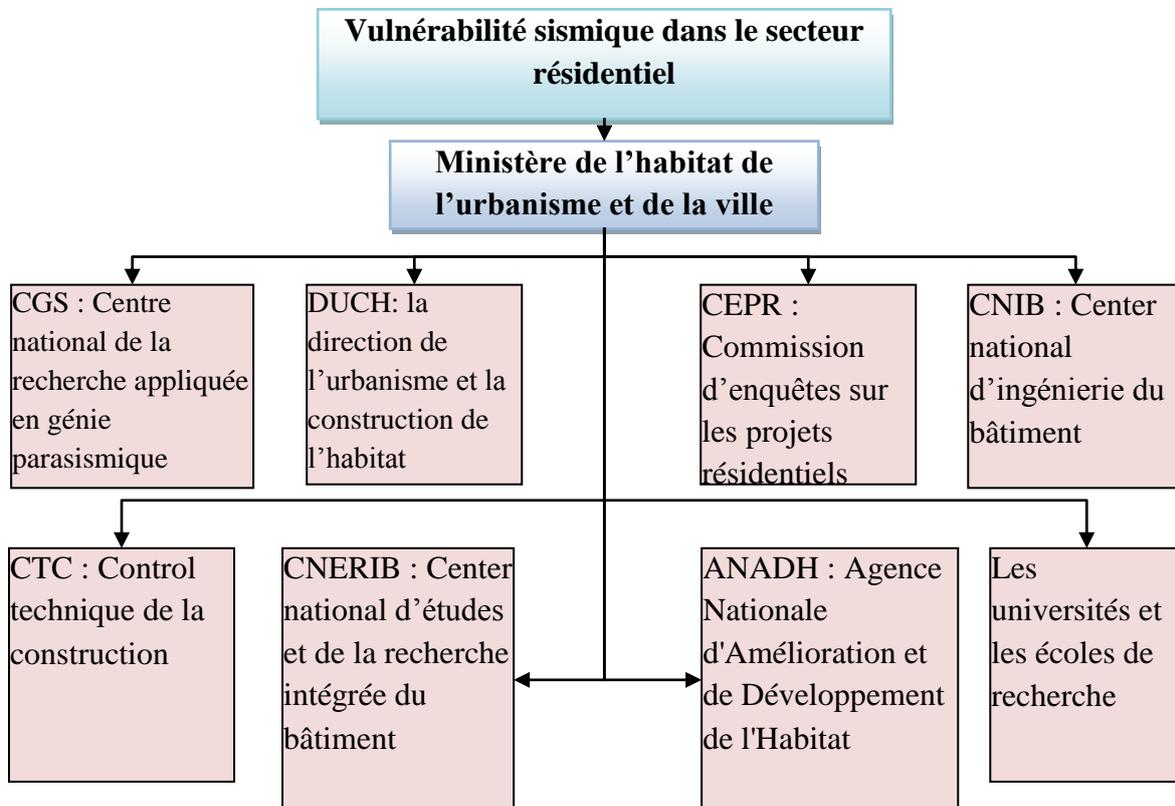


Figure II.34. Acteurs de la vulnérabilité sismique dans le secteur résidentiel algérienne

II.5 Conclusion

L'activité sismique du nord algérien se concentre 89% de la population Algérienne selon l'office nationale des statistiques. D'autre part, l'exposition à cette activité est continue puisqu'elle se produit tout le long de l'année (CRAAG, 2001). Or, nous avons vu dans la première partie de ce chapitre que le parc résidentiel algérien est majoritairement lourd et ancien et est ainsi vulnérable vis-à-vis des séismes.

Toutes ces raisons font de l'évaluation de la vulnérabilité des bâtis existants une nécessité. Et pour répondre à cette situation, nous proposons, dans le chapitre 3, une contribution au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation dans le contexte algérien.

Chapitre 03

**Développement d'une
méthodologie d'évaluation
de la vulnérabilité sismique
des bâtiments d'habitation
en Algérie**

III.1 Introduction

L'Algérie est une région avec une sismicité élevée. Au cours de son histoire, Elle a subi plusieurs tremblements de terre. Parmi les plus notables, le séisme de Chlef (1980), de Ain-Temouchent (1999) et dernièrement celui de Boumerdès (2003).

Le parc immobilier en Algérie est relativement ancien, et constitue une grande partie du parc immobilier, est le plus vulnérable et qui présente le plus grand risque d'effondrement lors d'un tremblement de terre. A cet effet, mesuré le niveau de vulnérabilité de ce parc est d'une grande utilité.

Nous essayons, de faire un vrai diagnostic et de définir une note de vulnérabilité sismique (indice de vulnérabilité 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 à l'élaboration de l'indice de vulnérabilité 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 orientée vers la conception de bâtiments durables.

III.2 Méthodologie d'évaluation proposée

III.2.1 Structure de la méthodologie

La méthode que nous proposons utilise des objectifs représentant les aspects principaux de l'objet quantifié 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 vulnérabilité 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.).

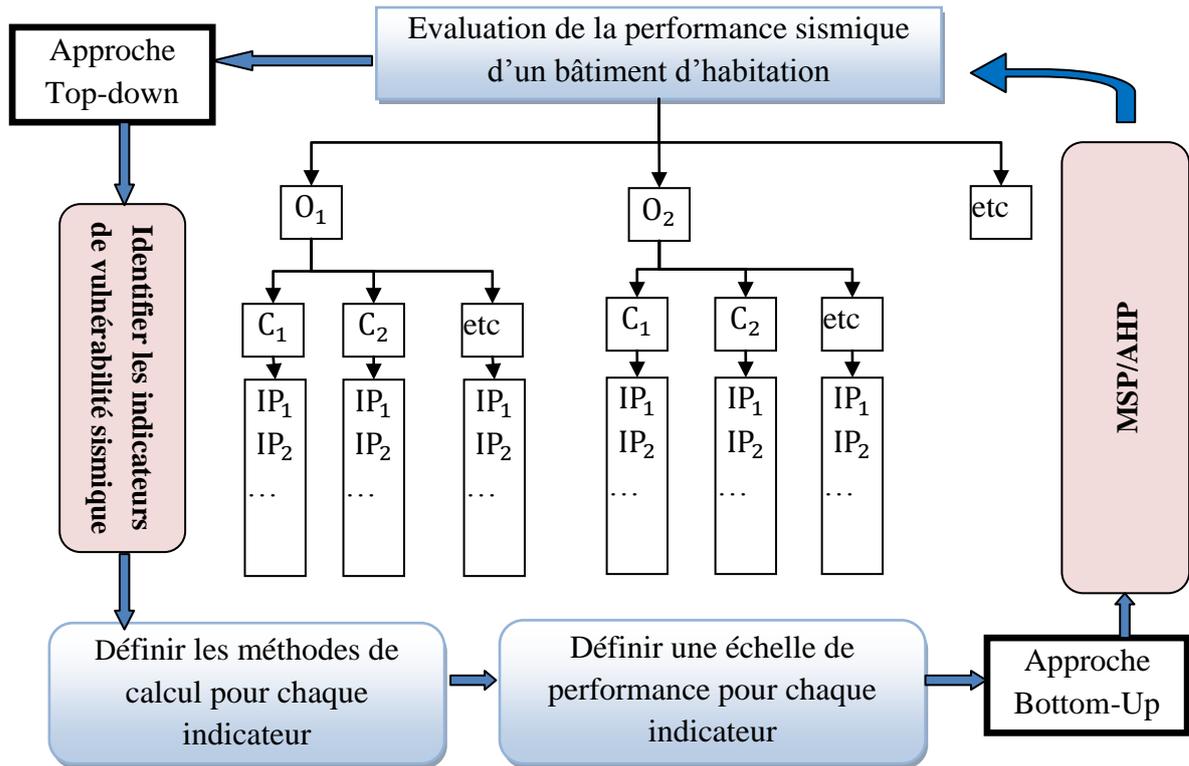


Figure III.1. Méthodologie adoptée pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique pour un bâtiment d'habitation

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 Approches Top-down et Bottom-up : deux approches opposées ou complémentaires ?

Les approches Top-down et Bottom-up sont deux démarches qui opposent traditionnellement concernant la construction d'un processus d'évaluation. La démarche « experte », dite « top-down », basée essentiellement sur les sciences, de l'ingénierie et de l'architecture et une démarche « Bottom-up », fondée sur les statistiques et la recherche opérationnelle (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 vulnérabilité sismique 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 vulnérabilité sismique (IVS) 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 la vulnérabilité

Objectif	critères	IPs	Sym b.	Unité	Référence
Vulnérabilité du sol (Vulnsol)	Stabilité du sol (stabsol)	Sol en surface	SS	/	(Battier, 2002) Ghislaine VERRHIEST (CETE Méditerranée)
		Type de site	TS	/	
		Proximité d'un changement de pente	PCP	m	
		Proximité général de terrain	PT	m	
		Proximité d'eau	PE	m	
		Proximité de soutènement	PS	m	
	Agressivité chimique (Agrchim)	Sulfate	SO ₄ ⁻	mg/l	(Moussaoui et Cherrared, 2015)
		Magnésium	Mg ⁺⁺	mg/l	
		Ammonium	NH ₄ ⁺	mg/l	
		Potentiel hydrogène	PH	mg/l	
Vulnérabilité de la structure (VulnStr)	Conception architecturale (ConcArch)	Régularité en plan	RP	/	(Battier, 2002) Ghislaine VERRHIEST (CETE Méditerranée)
		Régularité en élévation	REL	/	
		Elancement en plan	EP	/	
		Etages à hauteur différents	ET	/	
		Hauteur du bâtiment	HB	m	
		Parties saillantes ou rentrantes	PSR	/	
	Système structurel (SysStr)	Système de contreventement	SC	/	
		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	ans	
		Etat général de conservation	EC	/	
		Désordres structuraux constatés	DS	/	
		Risque de chute des éléments non structuraux	CNS	/	
		Projet de réhabilitation et/ou d'entretien pour anciens bâtiments	PR	/	

Tableau III.2. Tableau de bord de diagnostic de la vulnérabilité(Suite)

Objectif	Critère	Indicateurs de performance	Symb.	Unité	Référence
Vulnérabilité social (vulnsoc)	Âge	Ratio de la population âgée > 65ans	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 et Avram,2009)
	Qualité de vie	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	Distance aux hôpitaux	DH	Km	(Dwyer et al., 2004)
		Distance aux postes de protection civile	DPC	Km	
		Distance aux postes de police	DPP	Km	
	Accessibilité	Accessibilité au bâtiment (issues de secours, panneaux de signalisations)	ACB		(Dwyer et al., 2004)
Présence de zones libre et dégagé à l'extérieur du bâtiment		ZL			

Tableau III.3. Tableau de bord de diagnostic de la vulnérabilité (Suite)

Objectif	critère	IPs	Symb.	Unité	Référence
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	/	
		Eloignement par rapport à la mer	EM	Km	

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.

Les Tableaux III.4 – III.12 résument les méthodes de calcul des IPs définis dans les tableaux précédents.

Tableau III.4. Méthodes de calcul des IPs de l'objectif « vulnérabilité de sol »

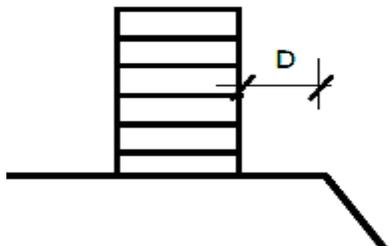
Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
Stabsol	SS	Relevé visuel in situ Rocher Alluvions Présence de sable Ancien marais	(Battier, 2002)
	TS	Etude mécanique de sol (Rapport de sol) : - Catégorie S1 : sol rocheux, - Catégorie S2 : sol ferme, - Catégorie S3 : sol meuble, - Catégorie S4 : sol très meuble.	(CGS, 2003)
	PT	Pente (\square) = $\frac{\Delta h}{d} \times 100$ Δh : 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)

Tableau III.5. Méthodes de calcul des IPs de l'objectif « vulnérabilité de sol » (Suite)

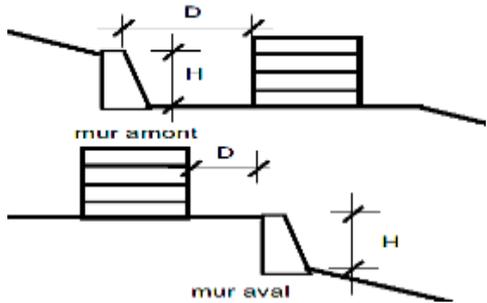
Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
Stabsol	PS	Distance (D) mesurée comme indiqué sur la figure ci-dessous 	(Battier, 2002)
Agressivité chimique	SO_4^- Mg^{++} NH_4^+	Etude chimique de sol (Rapport de sol) : - XA1 : environnement a faible agressivité chimique, - XA2 : environnement d'agressivité chimique modérée, - XA3 : environnement a forte agressivité chimique	(NF-EN 206/CN, 2014)
	PH	Mesure de PH (PH-mètre ou kit a PH) : - $5,50 \leq PH \leq 6,50$: Faible agressivité, - $4,50 \leq PH \leq 6,50$: Agressivité moyenne, - $4,00 \leq PH \leq 4,50$: Forte agressivité.	(NF-T 90-008, 2001)

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

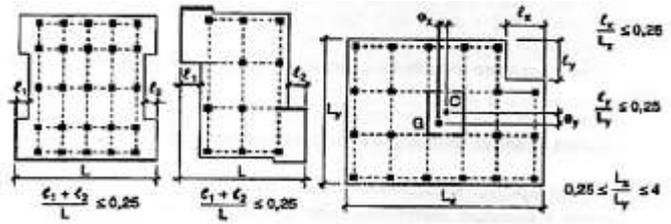
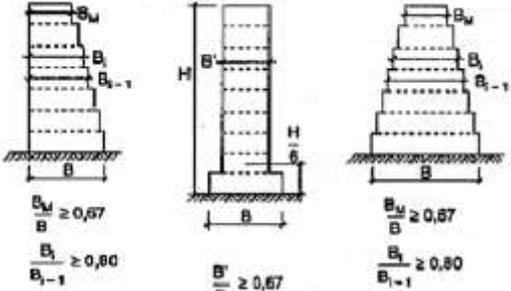
Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
Conception architecturale	RP	<p>Un bâtiment est classé régulier en plan si :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $(l_1 + l_2) / L \leq 0,25$ - $l_x / L_x \leq 0,25$ - $l_y / L_y \leq 0,25$ - $0,25 \leq L_x / L_y \leq 4$ 	(Battier, 2002 ; CGS, 2003)
	REL	<p>Un bâtiment est classé régulier en élévation si :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $B_m / B \geq 0,57$ et $B_i / B_{i-1} \geq 0,80$ -- $B' / B \geq 0,67$ 	
	EP	<p>On dit qu'il y a un élancement en plan si :</p> $0,25 \leq \frac{L_x}{L_y} \leq 4$	
	ET	Constat visuel in situ de l'existence d'étages souple.	

Tableau III.7.Méthodes de calcul des IPs du critère « Conception architecturale » (Suite)

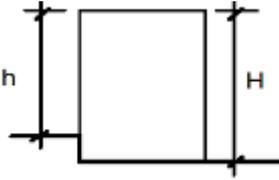
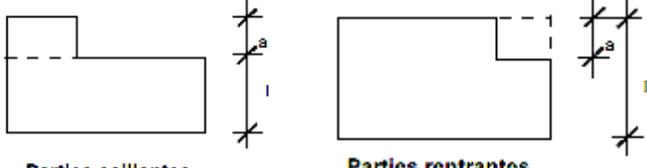
Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
Conception architecturale	HB	<p>La hauteur (H) du bâtiment (nombre de niveaux) est mesurée à partir de la surface libre du terrain jusqu'au sommet de la structure (y compris l'acrotère).</p> 	(Battier, 2002 ; CGS, 2003)
	PSR	<p>Une partie rentrante ou saillante 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"> - l_x, l_y : la somme des dimensions des parties saillante ou rentrante selon la direction x et y, - L_x, L_y : la largeur totale en plan selon la direction x et y.  <p style="text-align: center;">Parties saillantes Parties rentrantes</p>	

Tableau III.8. Méthodes de calcul des IPs du critère« Système de structurel »

Critère	IP	Méthode de calcul	Références												
Système structurel	SC	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. 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 :	(CGS, 2003)												
		<table border="1"> <tr> <td>Zone I</td> <td colspan="2">Zone II</td> <td>Zone III</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Zone IIa</td> <td>Zone IIb</td> <td></td> </tr> <tr> <td>$H \leq 17m$</td> <td>$H \leq 14m$</td> <td>$H \leq 11m$</td> <td>$H \leq 8m$</td> </tr> </table>		Zone I	Zone II		Zone III		Zone IIa	Zone IIb		$H \leq 17m$	$H \leq 14m$	$H \leq 11m$	$H \leq 8m$
		Zone I		Zone II		Zone III									
	Zone IIa	Zone IIb													
$H \leq 17m$	$H \leq 14m$	$H \leq 11m$	$H \leq 8m$												

Tableau III.9. Méthodes de calcul des IPs du critère« Système de structurel » (Suite)

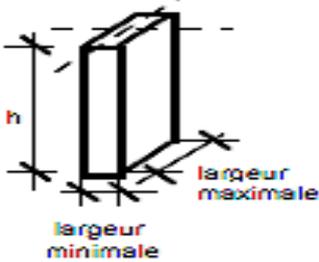
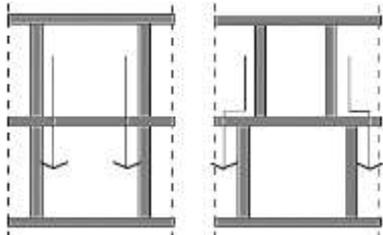
Critère	IP	Méthode de calcul	Référence	
Système structurel	PC	Un poteau est dit court si : la hauteur libre $h < 4 \times$ largeur maximale. (Risque de rupture par cisaillement)		(Battier, 2002)
	PEL	Un poteau est dit élancé si : la hauteur libre $h > 20 \times$ largeur minimale. (Risque de rupture par flambement)		
	AC	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. 		
	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	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. 	(Battier, 2002)	

Tableau III.10. Méthodes de calcul des IPs du critère « Système de structurel » (Suite)

Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
	BA	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. La largeur minimale d'un joint sismique séparant deux blocs est : $d_{min}=15(mm)+(\delta_1+\delta_2)\geq 40(mm)$ δ_1, δ_2 : déplacement max des deux blocs au sommet	(CGS, 2003)

Tableau III.11. Méthode de calcul des IPs du critère « Etat de la structure »

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).	/
	EC	L'état de conservation du bâtiment est évalué selon l'échelle suivante : <ul style="list-style-type: none"> • 1 = Bâtiment bien entretenu ou restauré selon les règles de l'art, • 2 = Bâtiment partiellement entretenu ou dont la restauration est aisée, • 3 = Bâtiment menaçant ruine ou déprécié par une rénovation ou une transformation, • 4 = Bâtiment en état de ruine. 	(Conservation du patrimoine architectural alpestre – A, 1999)
	DS/CNS/PR	Constats visuels lors de visites in-situ.	/

Tableau III.12. Méthode de calcul des IPs de l'objectif « Vulnérabilité social »

Critère	IP	Méthode de calcul	Référence
Âge	PA	$= \frac{\text{Nbre PA}}{\text{Population totale}}$	(Armaş, 2012)
	RE	$= \frac{\text{Nbre RE}}{\text{Population totale}}$	
Sexe	PF	$= \frac{\text{Nbre PF}}{\text{Population totale}}$	(Armaş, 2012)
	FE	$= \frac{\text{Nbre FE}}{\text{Population femelle totale}}$	
	FPE	$= \frac{\text{Nbre FPE}}{\text{Population femelle totale}}$	
Qualité de vie	NES	$= \frac{\sum_1^n \text{Note de chaque personne}}{\sum_1^n \text{Nombre total des personne}}$	(Moussaoui, 2018)
	MPH	$= \frac{\text{Nombre des personne malades}}{\sum_1^n \text{Totalité des individus}}$	(Fertas, 2020)
	TO	$P\% = \frac{\sum_1^n \text{Personne occuptes}}{\sum_1^n \text{Totalité des personnes}}$ Moyenne P% = $\frac{\sum_{i=1}^n P\%}{4}$	(Armaş, 2012)
Secourisme	DH DPC APP	Mesure de la distance sur GoogleMaps	/
Accessibilité	ACB/ZL	/	(Armaş, 2012)

Tableau III.13.Méthode de calcul des IPs de l'objectif « Vulnérabilité environnementale »

Objectif	IP	Méthode de calcul	Référence
Vulnérabilité Env	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)	/
	EM	Mesure de la distance sur GoogleMaps	/

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 Echelles de performance des IPs du critère « Stabilité de sol »

Selon la méthode (Battier, 2002) on propose ces échelles de performances pour l'évaluation des indicateurs suivantes :

A. Indicateur : Sol en surface (SS)

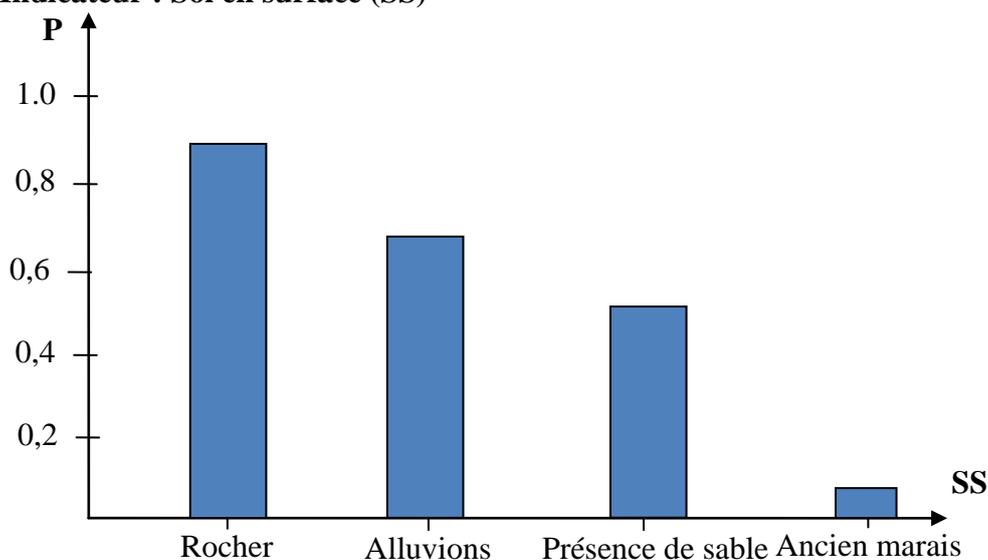


Figure III.2. Echelle de performance de l'indicateur « SS »

B. Indicateur : Type de site (TS)

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

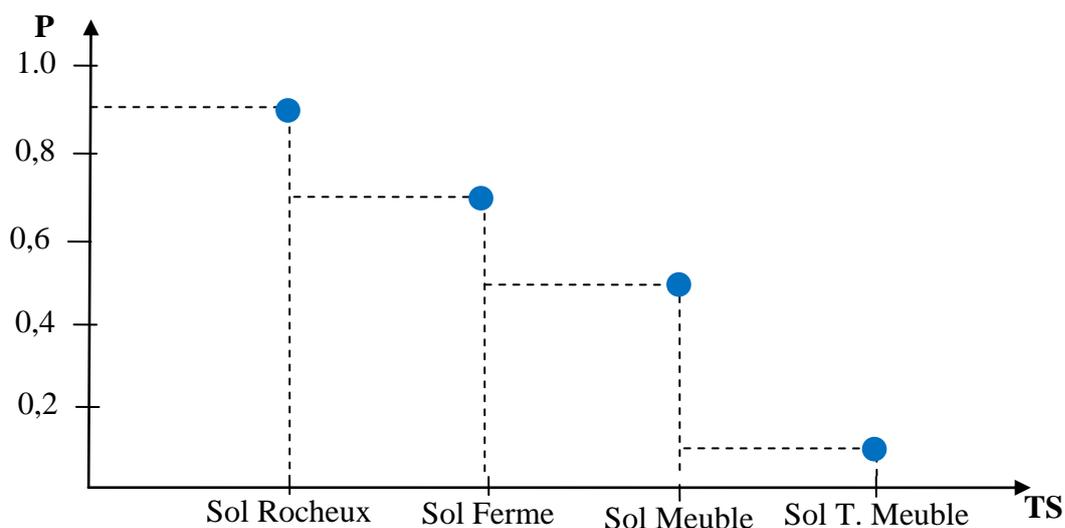


Figure III.3. Echelle de performance de l'indicateur « TS »

C. Indicateur : Pente générale de terrain (PT)

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

Tableau III.14. Echelle de performance de l'indicateur (PT)

Indicateur	Nulle 0	Très faible $P < 10^\circ$	Faible $10^\circ < P < 20^\circ$	Modérée $20^\circ < P < 30^\circ$	Forte $30^\circ < P < 40^\circ$	Très forte $> 40^\circ$
performance	1	0.9	0.7	0.5	0.2	0.1

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

Tableau III.15. Echelle de performance de l'indicateur « PCP »

Indicateur	Faille proche à la construction	
Distance	$D > 2H$	$D < 2H$
performance	Bonne (0.9)	Mauvaise (0.1)

E. Indicateur : proximité d'eau (PE)

Tableau III.16. Echelle de performance de l'indicateur « PE »

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

F. Indicateur : Proximité de soutènement (PS)

Tableau III.17.Echelle de performance de l'indicateur « PS »

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

III.3.3.2 Echelles de performance des IPs du critère « Agressivité chimique »

Tableau III.18. Echelle de performance des IPs du critère « AgrChim »

Degrés d'agressivité	Nulle	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Agents agressifs	Concentration en mg/l				
SO ₄ ⁻	<250	250 à 600	600 à 1500	1500 à 6000	>6000
Mg ⁺⁺	<100	100 à 300	300 à 1500	1500 à 3000	>3000
NH ₄ ⁺	<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 Echelles de performance des IPs du critère « Conception architecturale »

Pour offrir une meilleure résistance aux séismes, les ouvrages doivent, de préférence avoir, d'une part des formes simples, d'autre part, une distribution aussi régulière que possible des masses et des rigidités tant en plan qu'en élévation. C'est l'objectif de ce critère (RPA, 2003).

A. Indicateur : Régularité en plan (RP)

Tableau III.19. Echelle de performance de l'indicateur « RP »

Régularité en plan	Bâtiment régulier	Bâtiment non régulier
Performance	1	0.1

B. Indicateur : Elancement en plan (EP)

Tableau III.20.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.21. Echelle de performance de l'indicateur « REL »

Régularité en élévation	Bâtiment régulier	Bâtiment non régulier
Performance	1	0.1

E. Indicateur : Etages à hauteur différentes (ET)

Tableau III.22. Echelle de performance de l'indicateur « ET »

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

F. Indicateur : hauteur de bâtiment (HB)

Tableau III.23. Echelle de performance de l'indicateur « HB »

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

G. Indicateur : Parties saillantes ou rentrantes (PSR)

Tableau III.24. Echelle de performance de l'indicateur « PSR »

Indicateur	$\frac{lx}{Lx} \leq 0.25 ; \frac{ly}{Ly} \leq 0.25 ; 0.25 \leq \frac{Lx}{Ly} \leq 4$	Sinon
Performance	Bonne (0.9)	Mauvaise (0.1)

III.3.3.4 Echelles de performance des IPs du critère « Système structurel »

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.25. Echelle de performance de l'indicateur « SC » (Portique auto stable)

Zone	I		II				III	
			IIa		IIb			
Condition	$N_{étage} \leq$	Sinon	$N_{étage} \leq 4$	Sinon	$N_{étage} \leq$	Sinon	$N_{étage} \leq$ $5H \leq 8m$	Sinon

	5H ≤ 17m		H ≤ 14m		5H ≤ 11m			
Perfor.	Bonne	Mauv.	Bonne	mauvaise	Bonne	Mauv.	Bonne	Mauv.

Tableau III.26. Echelle de performance de l'indicateur « SC »(construction mixte)

Zone	I ; II ; III	
Condition	$N_{étage} \leq 10$; H ≤ 14m	Sinon
performance	Bonne	Mauvaise

B. Indicateur : poteau court/élancé (PC/PEL)

Tableau III.27.Echelle de performance des indicateurs « PC/PEL »

Indicateur	Présence du poteau court/élancé	Absence du poteau court/élancé
performance	0.1	1

C. Indicateur : Alignement des éléments verticaux de contreventement (AC)

Tableau III.28.Echelle de performance de l'indicateur « AC »

Indicateur	Superposé et verticalement régulier	Sinon
Performance	Bonne (0.9)	Mauvaise (0.1)

D. Indicateur : continuité des éléments de contreventement en hauteur (CC)

Tableau III.29. Echelle de performance de l'indicateur « CC »

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

E. Indicateur : Forte différence de contreventement en (plan et en élévation)

Tableau III.30.Echelle de performance de l'indicateur « DC »

Indicateur	Existence de forte différence	Sinon
Performance	Mauvaise (0.1)	Bonne (0.9)

F. Indicateur : Bâtiment 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.31. Echelle de performance de l'indicateur « BA »

Epaisseur	D <4cm	D >4cm
Performance	Mauvaise 0.1	Bonne 0.9

III.3.3.5 Echelles de performance des IPs du critère « Etat de la structure »

A. Indicateur : Âge de bâtiment (AB)

Tableau III.32. Echelle de performance de l'indicateur « AB »

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

B. Indicateur : Etat générale de conservation (EC)

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

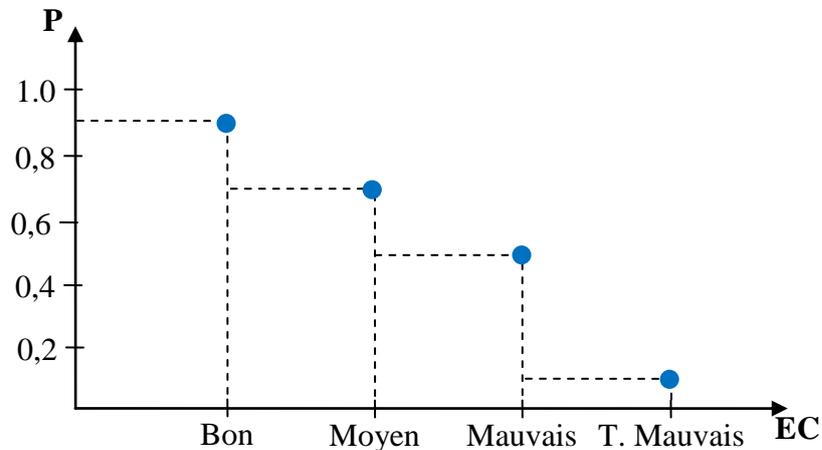


Figure III.4. Echelle de performance de l'indicateur « EC »

C. Indicateur : Désordres structuraux constatés (DS)

Tableau III.33. Echelle de performance de l'indicateur « DS »

Indicateur	Oui	Non
Performance	0.1	1

D. Indicateur : Risque de chute des éléments non structuraux (CNS)

Tableau III.34. Echelle de performance de l'indicateur « CNS »

Indicateur	Oui	Non
Performance	0.1	1

G. Indicateur : projet de réhabilitation et / ou d'entretien pour les anciens bâtiments (PR)

Tableau III.35. Echelle de performance de l'indicateur « PR »

Indicateur	Oui	Non
Performance	1	0.1

III.3.3.6 Echelles de performance des IPs du critère « Âge » et « Sexe »

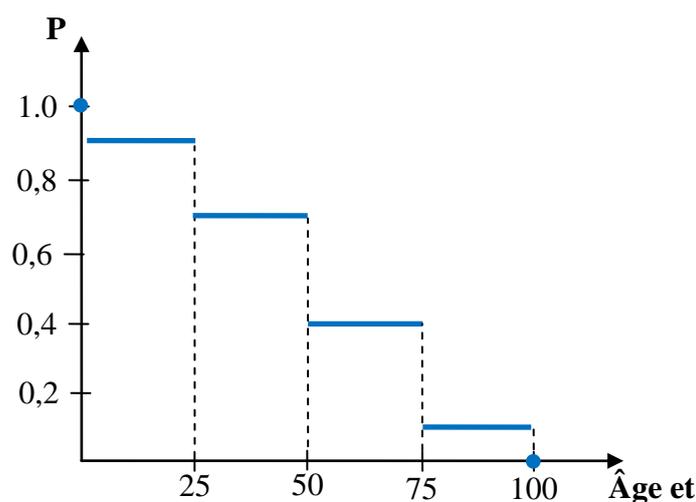


Figure III.5. Echelle de performance de l'indicateur « Âge » et « Sexe »

III.3.3.7 Echelles de performance des IPs du critère « Qualité de vie »

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.

Tableau III.36. Questionnaire proposées à la population résidente du bâtiment

<p>Question 1 : que devriez-vous faire avant un séisme ? (4 points)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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. 	<p>Question 2 : Que faites-vous lors d'une secousse de terre ? (6 points)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sauter de la fenêtre. • Fuir directement vers l'extérieur. • Attendre la secousse passe. • S'agripper sous un élément structural rigide.
<p>Question3 : Apres la première secousse qu'allez-vous faire ? (4 points)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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. 	<p>Question 4 : que devriez-vous faire après les secousses ? (4 points)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rester et attendre. • Retourner à la maison. • Appeler et signaler les urgences.
<p>Question 5 : qui sont les actions à suivre ? (2 points)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fuir et utiliser l'ascenseur. Se prendre les couloirs sans savoir où se mènent. • Utiliser les panneaux d'aide à sortir. Se calmer et maitriser les choses à faire. 	

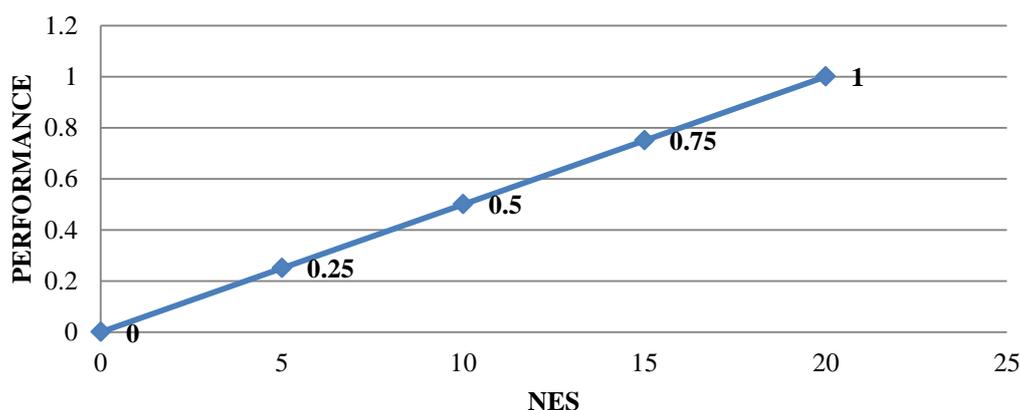


Figure III.6. Echelle de performance de l'indicateur « NES »

B. Indicateur : Mobilité physique des occupants (MPH)

Tableau III.37. 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

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

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

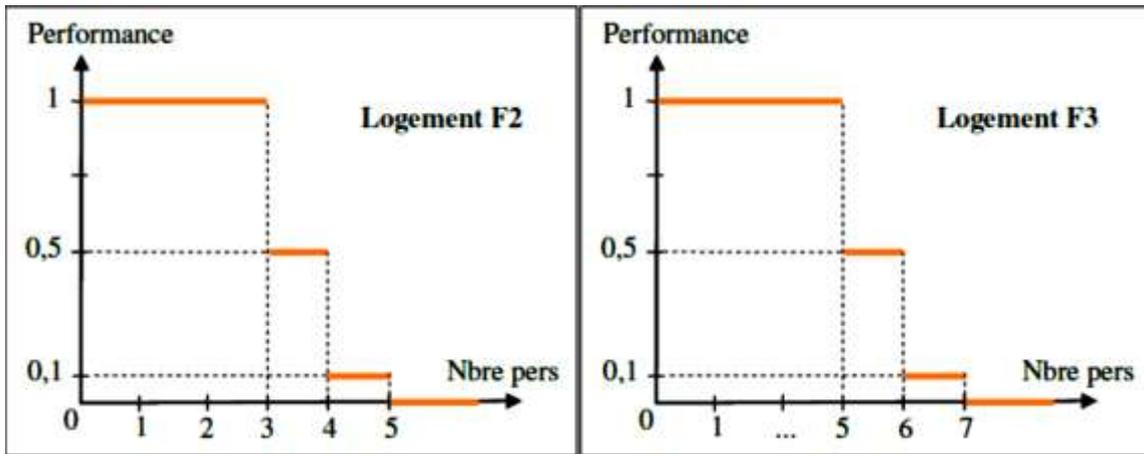


Figure III.7. Echelle de performance de l'indicateur « TO » (logements F2 et F3)

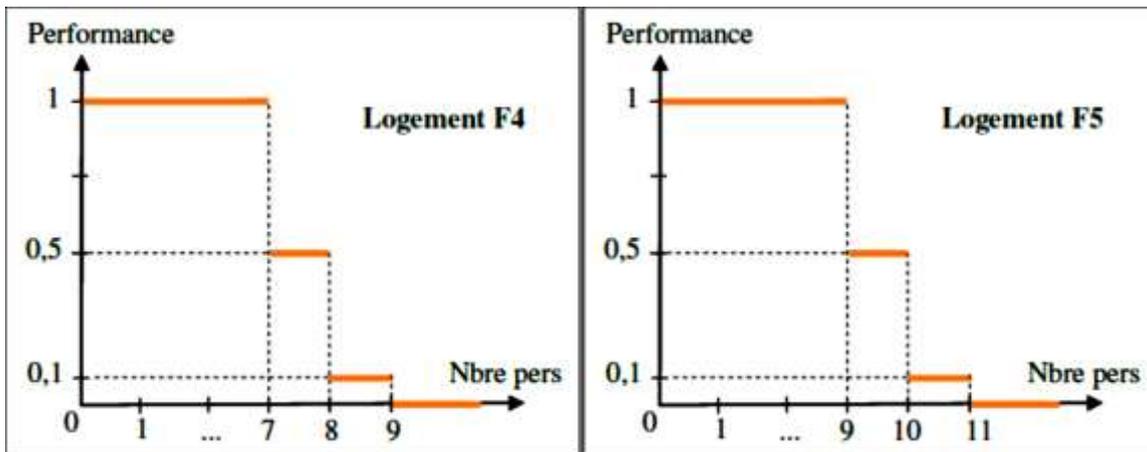
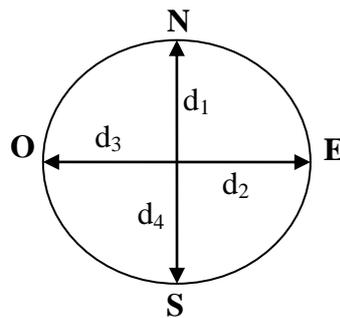


Figure III.8. Echelle de performance de l'indicateur « TO » (logements F4 et F5)

III.3.3.8 Echelles de performance des IPs du le critère « Secourisme »

D'après l'enquête que nous avons faite avec la protection civile, on à constater qu'ils utilisent une méthode pratique pour calculer une distance moyenne.

La méthode consiste à calculer une distance de référence pour les bâtiments en zone urbaine et en zone rurale. Pour ceci, une patrouille de pompiers est envoyée sur un véhicule léger circulant avec des vitesses de références fixes en un temps fixe. Cette opération est effectuée dans quatre directions de la zone et une distance est à chaque fois mesurée (Figure ci-dessous).



- Pour une zone Urbaine : Vitesse = 40 Km/h et Temps =15 minutes

$$D_{ref} = (d_1+d_2+d_3+d_4) /4 =8 \text{ km}$$

- Pour une zone Rural : Vitesse = 60 Km/h et Temps = 25 minutes

$$D_{ref} = (d_1+d_2+d_3+d_4) = 13 \text{ Km/h}$$

Tableau III.38.Echelle de performance des indicateurs « DH/DPC/DPP »

Distance (Km)	Dref/2	Dref	Dref ×2	Dref ×4
Performance	0.9	0.7	0.4	0.1

III.3.3.9 Echelles de performance des IPs du critère « Accessibilité »

A. Indicateur : Présence de zone libre de dégages (ZL)

Tableau III.39. Echelle de performance de l'indicateur « ZL »

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

B. Indicateur : Accessibilité au bâtiment (ACB)

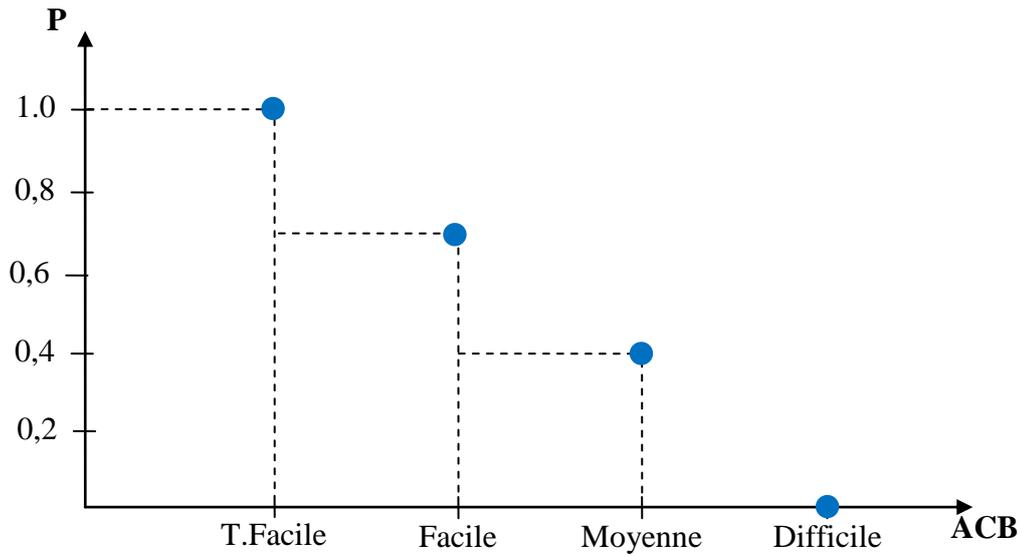


Figure III.9. Echelle de performance de l'indicateur « ACB »

III.3.3.10 Echelles de performance des IPs de l'objectif « Vulnérabilité environnementale »

A. Indicateur : Zonage sismique (ZS)

Le territoire national est divisé en quatre (04) zones de sismicité croissante comme indiqué le tableau suivant :

Tableau III.40. Echelle de performance de l'indicateur « ZS »

Zone	Zone 0	Zone I	Zone II		Zone III
			IIa	IIb	
Sismicité	Négligeable	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 (Amoy)

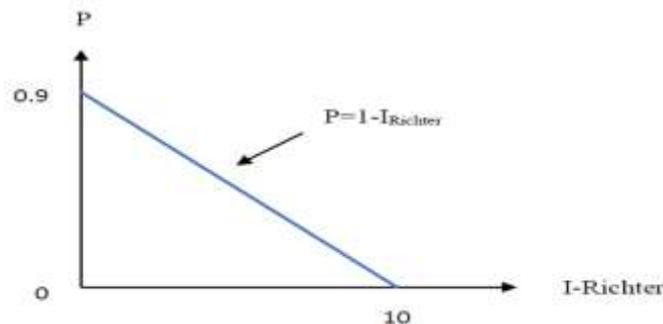


Figure III.10. Echelle de performance de l'indicateur « Amoy »

C. Indicateur : Code de construction utilisé (CCU)

Tableau III.41.Echelle de performance de l'indicateur « CCU »

Règlement	RPA 99 v 2003	RPA 99	RPA 88	RPA 83,81 et AS55
Performance	1	0.7	0.4	0.1

D. Indicateur : Eloignement de bâtiment par rapport à la mer (EM)

Tableau III.42. Echelle de performance de l'indicateur « EM »

Distance	0-5 km	> 5 km
Performance	0.1	1

III.4 Approche « Bottom-up » Agrégation multicritère

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 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 IPs, 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'agrèger les critères grâce à une somme pondérée.

III.4.3 Méthode AHP

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 répondue 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 Présentation générale de la méthode

La méthode de l'AHP est développée par [Saaty en 1977](#). Elle a été conçue pour remédier aux difficultés de communication qu'il existait entre les avocats et les scientifiques, par le manque d'approche pratiques et systématiques pour le l'arrangement et la prise de décision prioritaire.

La procédure d'analyse hiérarchique (AHP) n'est pas une formule magique ou un modèle qui trouve la bonne réponse. Plutôt, c'est un processus qui aide le décideur dans sa quête d'une meilleure réponse. La chose la plus difficile au sujet d'AHP est son titre, Analytic Hierarchic Process :

- **Analytic (analyse)** : L'analyse est l'opposé de la synthèse, qui implique de remonter ou combiner des pièces pour en faire une entité.
- **Hierarchic (hiérarchique)** : une entité est presque toujours hiérarchique en structure. Cela veut dire qu'elle est divisée en unités qui sont subdivisés en plus petites unités.
- **Process (procédure)** : une procédure est une série d'action, de transformation, ou de fonctions qui génère une fin ou un résultat.

III.4.3.2 Etapes de la procédure AHP

Cette méthode se décompose en quatre étapes ([Cherqui, 2005](#)):

- 1) Hiérarchisation des indicateurs par importance du plus important au moins important.
- 2) Construction d'une matrice à partir de la comparaison de deux à deux des indicateurs.
- 3) Détermination des poids associés à chaque indicateur grâce à une méthode approchée de calcul des vecteurs propres
- 4) Vérification de la consistance du résultat.

Hiérarchisation des indicateurs par importance

Après l'arrangement du problème en un modèle hiérarchique, cette étape consiste à l'établissement des priorités entre indicateurs appartenant au même critère, selon le principe de l'importance. Soit $I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n$ l'ensemble des indicateurs dont on cherche le coefficient de pondération. Selon le principe de la hiérarchisation, I_1 est plus importante que I_2 , jusqu'à, I_n est l'indicateur le moins important. L'importance ici n'est pas stricte, I_{i-1} peut être aussi important que I_i .

Comparaison des indicateurs par importance

Afin d'établir les préférences, une échelle de valeurs doit être choisie, pour spécifier le degré d'importance d'un indicateur par rapport à un autre. Nous adoptons l'échelle de valeur (1-9), voir le tableau ci-dessous (Harker, 1989), permettant d'introduire les jugements du décideur plus proche de sa réalité. Soit w_i le poids de l'indicateur I_i . La comparaison par paire des indicateurs conduit à définir le degré d'importance d'un indicateur par rapport à l'autre en fonction du tableau suivant :

Tableau III.43. Degré d'importance des 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.	

A titre d'exemple, si l'indicateur I_i possède une importance essentielle par rapport à l'indicateur I_j , le rapport w_i/w_j sera égal à 5. La comparaison entre tous les indicateurs donne la matrice suivante :

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

a_{ij} est l'intensité de l'importance de I_i sur I_j et w_i le coefficient de pondération associé à I_i .

Détermination des poids associés à chaque indicateur

Dans cette étape, nous allons calculer le vecteur des coefficients de pondération $W=\{w_1...w_2...w_n\}$. Pour ce faire, nous divisons chaque a_{ij} par la somme des valeurs de la colonne correspondante et ensuite nous effectuons une moyenne par ligne, soit l'opération mathématique suivante :

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

Donc chaque coefficient w_i est obtenu par la formule suivante :

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

Dont la somme des w_i doit être égale à 1.

Vérification de la consistance de résultat

Un grand avantage de la méthode est qu'elle calcule un indice dit « ratio de consistance » ou bien d'indice 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. Il fournit une mesure de la probabilité que la matrice a été complétée purement au hasard. A titre d'exemple, si le ratio CR est égal 0,20, cela veut dire qu'il y a une chance de 20 % que le décideur ait répondu aux questions d'une façon purement aléatoire. Donc il est recommandé que le décideur révise quelques jugements. Ainsi, l'AHP n'exige pas des

décideurs d'être cohérent mais plutôt fournit une mesure d'incohérence et permet de réduire cette incohérence.

On définit les vecteurs suivants :

$$[\lambda'_1 \dots \lambda'_i \dots \lambda'_n] \text{ et } [\lambda_1 \dots \lambda_i \dots \lambda_n] \text{ tel que :}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda'_1 \\ \dots \\ \lambda'_i \\ \dots \\ \lambda'_n \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n w_k \times \begin{bmatrix} a_{1k} \\ \dots \\ a_{ik} \\ \dots \\ a_{nk} \end{bmatrix} = w_1 \times \begin{bmatrix} a_{11} \\ \dots \\ a_{1i} \\ \dots \\ a_{1n} \end{bmatrix} + \dots + w_i \times \begin{bmatrix} a_{i1} \\ \dots \\ a_{ii} \\ \dots \\ a_{in} \end{bmatrix} + \dots + w_n \times \begin{bmatrix} a_{n1} \\ \dots \\ a_{ni} \\ \dots \\ a_{nn} \end{bmatrix}$$

Et : $\lambda_i = \frac{\lambda'_i}{w_i}$ Puis : $\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n}$

L'index de consistance CI (Saaty, 1996) est alors : $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$

Pour calculer le ratio de consistance CR, on divise l'index de consistance par une valeur RI dépendant du nombre d'indicateur n donnés par la table suivante :

Tableau III.44 . Valeurs de RI

Taille de la matrice (n)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	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

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

L'attribution des poids est jugée acceptable si CR est inférieur à 0,1. Dans le cas contraire, la procédure doit être de nouveau appliquée. Le vecteur λ'_i maximum indique la ligne dans laquelle il y a un problème avec un coefficient a_{ij} . Si plusieurs coefficients sont en cause, l'erreur devient plus difficile à localiser.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différentes étapes de la méthodologie pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation à d'une approche structurée par deux approches complémentaires :

- Dans la première approche dite : « Top-down » nous avons défini les différents paramètres nécessaires à l'évaluation (objectifs, critères et IPs). A chaque IPs, nous avons défini une méthode de calcul et une échelle de performance.
- Ensuite, dans la seconde approche dite : « Bottom-up », le processus d'agrégation adoptée a été défini ou nous avons retenu la méthode de la somme pondérée par la méthode AHP pour le calcul de performance des niveaux supérieur de notre méthodologie.

Chapitre 04

**Application de la
méthodologie proposée sur
des cas réels de bâtiments
d'habitation à Bouira**

IV.1 Introduction

A l'issue du travail mené jusqu'à maintenant, nous confrontons dans ce chapitre la méthodologie développée à trois cas réels de bâtiment d'habitation. Les deux premiers cas sont construits dans la ville de Bouira (ancienne ville et nouvelle zone urbaine) et le troisième est dans une zone rurale à Ait Laaziz. Ce choix a été fait pour tenir compte des différents aspects de notre méthodologie (ancienneté de la structure, éloignement, code de construction utilisée).

Nous commencerons dans un premier lieu par la présentation de ces trois cas d'études. 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. Enfin, nous terminerons par une agrégation des performances dans le but d'évaluer la vulnérabilité de notre cas d'étude.

IV.2 Présentation des cas d'étude

IV.2.1 Cas d'étude n°01 : 126 logements à l'ancienne ville de Bouira

Le premier cas d'étude est la cité 126 logements localisé à l'ancienne ville de Bouira. Les informations relatives à ce premier cas d'étude sont résumées dans les Figures IV.1 et IV.2.



Figure IV.1. Localisation du cas d'étude n°01 (Source : Google Earth)



Figure IV.2. Photos prises sur le site du premier cas d'étude

IV.2.2 Cas d'étude n°02 : Projet 2000 logements AADL

Le deuxième cas d'étude est une partie (90 logements ; 4 blocs) du nouveau projet 2000 logements AADL construit en 2021.



Figure IV.3. Localisation du cas d'étude n°02 (Source : Google Earth)



Figure IV.4. Photos prises sur le site du deuxième cas d'étude

IV.2.3 Cas d'étude n°03 : Logements sociaux sis à Ait Laaziz

Le dernier cas d'étude est 2 blocs de bâtiments (30 logements) dans la zone rurale d'Ait Laaziz construits en 2010.

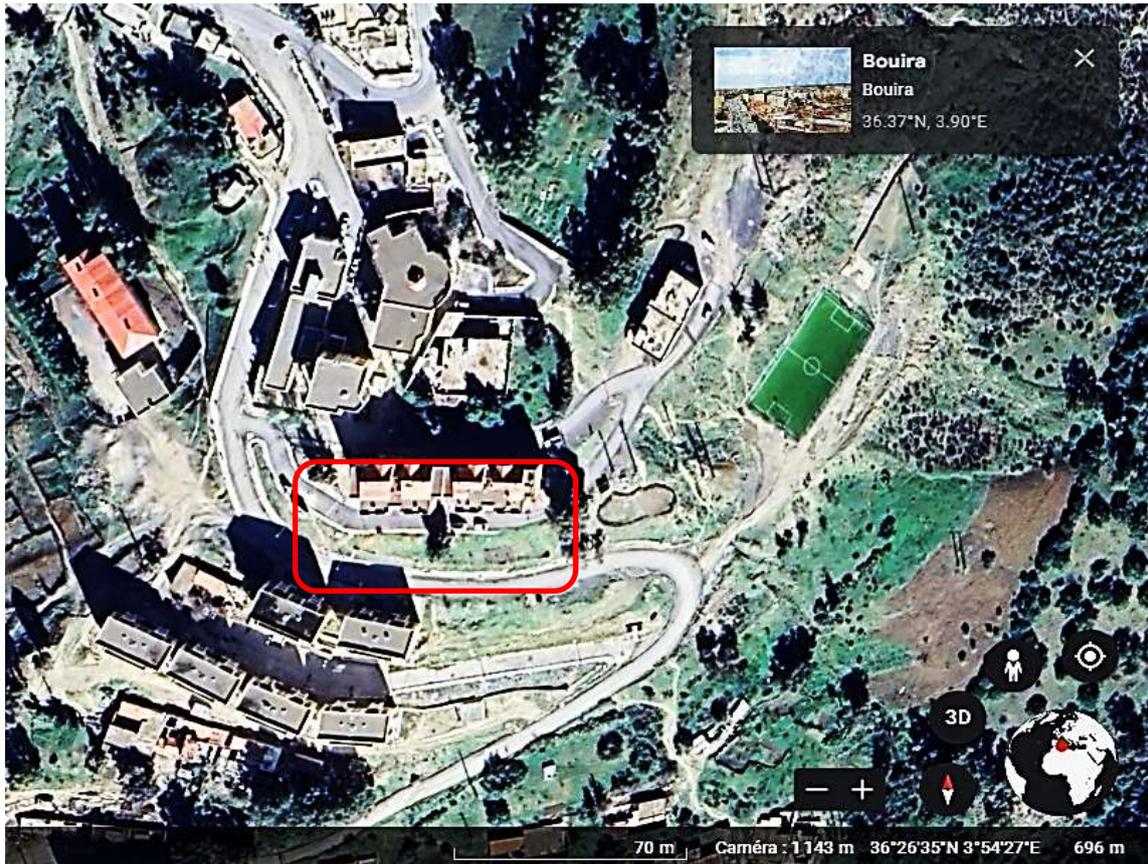


Figure IV.5. Localisation du cas d'étude n°03 (Source : Google Earth)



Figure IV.6. Photos prises sur le site du troisième cas d'étude

IV.3 Application de la méthodologie

En utilisant les méthodes de calcul et les échelles de performance nous calculerons puis évaluerons les performances de chaque IPs

IV.3.1 Cas d'étude n°01

Tableau IV.1. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Stabilité de sol	SS	Ancien marée	
	TS	Site meuble	
	PT	P=0 donc pas de pente	
	PCP	D= 30m donc D >2H	
	PE	D= 5m donc D < 100m	
	PS	D= 35m donc D > 2H	
Agressivité chimique	Sulf	L'agressivité chimique dans la zone de ville de Bouira est nulle selon les rapports de sol du laboratoire de l'habitation et de la construction	
	Magn		
	Amon		
	PH		
Conception architecturale	RP	Bâtiment régulier	
	EP	Bâtiment non élancé	
	REL	Bâtiment régulier	
	ET	Absence de l'étage transparent	
	HB	H=3.06*4 +4.08 =16.32m Zone II Lim < H < 20	
	PSR	Bonne	

Tableau IV.2. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Système structurel	SC	Zone IIa H>14 m	
	PC	Absence du poteau court	
	PEL	Absence du poteau élancé	
	AC	Superposé et verticalement régulier	
	CC	Continuité des éléments et le transmet des charges	
	DC	Absence de forte différence	
	BA	D < 4 cm	
Etat de la structure	AB	2022-1988= 34 ans	
	EC	Mauvais	
	DS	Oui	
	CNS	Oui	
	PR	Non	
Âge	PA	$PA_8 = (5/41)*100 = 12.19\%$ $PA_9 = (3/28)*100 = 10.71\%$	
	RE	$RE_8 = (7/41)*100 = 17.07\%$ $RE_9 = (12/28)*100 = 42.85\%$	

Tableau IV.3. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Sexe	PF	$PF_8 = (9/41) * 100 = 21.95\%$ $PF_9 = (8/28) * 100 = 28.57\%$	
	FE	$FE_8 = (0/9) * 100 = 0\%$ $FE_9 = (0/7) * 100 = 0\%$	
	FPE	$FPE_8 = (1/9) * 100 = 11.11\%$ $FPE_9 = (0/7) * 100 = 0\%$	
Qualité de vie	NES	$NES_8 = 262 / 34 = 7.70$ $NES_9 = 89 / 16 = 5.56$	
	MPA	$MPA_8 = (8/41) * 100 = 19.51\%$ $MPA_9 = (2/28) * 100 = 7.14\%$	
	TO	Les blocs sont de F3 donc : $TO_8 = 41/6 = 6.83$ $TO_9 = 28/6 = 4.66$	
Secourisme	DH DPC DPP	Zone urbaine Dref = 8 Km D = 3.7 Km	
Accessibilité	ACB	Moyenne	
	ZL	Moyennement suffisante	

Tableau IV.4. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)

Objectif	IPs	Valeur de calcul	Performance
VulnEnv	ZS	Bouira zone IIa moyenne sismicité	<p>Detailed description: A radar chart with four axes representing IP categories: ZS (top), Amoy (right), EM (left), and CCU (bottom). Two data series are plotted: Bât 8 (orange line with diamond markers) and Bât 9 (blue line with square markers). The values for Bât 8 are: ZS=0.6, Amoy=0.7, EM=1, CCU=0.1. The values for Bât 9 are: ZS=0.6, Amoy=0.7, EM=1, CCU=0.1. A legend at the bottom indicates Bât 8 (orange diamond) and Bât 9 (blue square).</p>
	Amoy	D'après le CRAAG	
	CCU	RPA 83	
	EM	D= 90 km donc D > 5 Km	

Tableau IV.5. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Stabilité de sol	SS	Ancien marais	<p>Detailed description: A radar chart with six axes representing IP categories: SS (top), TS (top-right), PT (right), PCP (bottom-right), PE (bottom-left), and PS (left). Two data series are plotted: Bât 24 (orange line with diamond markers) and Bât 26 (blue line with square markers). The values for Bât 24 are: SS=0.1, TS=0.5, PT=1, PCP=0.9, PE=0.1, PS=0.9. The values for Bât 26 are: SS=0.1, TS=0.5, PT=1, PCP=0.9, PE=0.1, PS=0.9. A legend at the bottom indicates Bât 24 (orange diamond) and Bât 26 (blue square).</p>
	TS	Site meuble	
	PT	P=0 donc pas de pente	
	PCP	D= 30m donc D > 2H	
	PE	D= 5m donc D < 100m mauvaise	
	PS	D= 35m donc D > 2H	
Agressivité chimique	Sulf	L'agressivité chimique dans la zone de ville de Bouira est nulle selon les rapports de sol de laboratoire de l'habitation et de la construction.	<p>Detailed description: A radar chart with four axes representing IP categories: Sulf (top), Mgnm (right), Amon (bottom), and PH (left). Two data series are plotted: Bât 24 (orange line with diamond markers) and Bât 26 (blue line with square markers). All values for both buildings are 1. A legend at the bottom indicates Bât 24 (orange diamond) and Bât 26 (blue square).</p>
	Magn	Bouira est nulle selon les rapports de sol de laboratoire de l'habitation et de la construction.	
	Ammon	Bouira est nulle selon les rapports de sol de laboratoire de l'habitation et de la construction.	
	PH	Donc la performance est excellente.	
Conception architecturale	RP	Bâtiment régulier	<p>Detailed description: A radar chart with six axes representing IP categories: RP (top), EP (top-right), REL (right), ET (bottom-right), HB (bottom-left), and PSR (left). Two data series are plotted: Bât 24 (orange line with diamond markers) and Bât 26 (blue line with square markers). The values for Bât 24 are: RP=1, EP=1, REL=1, ET=1, HB=0.7, PSR=0.9. The values for Bât 26 are: RP=1, EP=1, REL=1, ET=1, HB=0.7, PSR=0.9. A legend at the bottom indicates Bât 24 (orange diamond) and Bât 26 (blue square).</p>
	EP	Bâtiment non élancé	
	REL	Bâtiment régulier	
	ET	Absence de l'étage transparent	
	HB	H=3.06*4 + 4.08 = 16.32m Zone II Lim < H < 20	
	PSR	Bonne	

Tableau IV.6. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Système structurel	SC	Zone IIa H>14 m donc mauvaise	
	PC	Absence du poteau court	
	PEL	Absence du poteau élancé	
	AC	Superposé et verticalement régulier	
	CC	Continuité des éléments et le transmet des charges	
	DC	Absence de forte différence	
	BA	D< 4 cm donc mauvaise	
Etat de la structure	AB	2022-1988= 34 ans donc moyenne	
	EC	Mauvais	
	DS	Oui	
	CNS	Oui	
	PR	Non	
Âge	PA	$PA_{24} = (1/36) * 100 = 2.77\%$ $PA_{26} = (2/26) * 100 = 7.69\%$	
	RE	$RE_{24} = (11/36) * 100 = 30.55\%$ $RE_{26} = (8/26) * 100 = 30.76\%$	
Sexe	PF	$PF_{24} = (9/36) * 100 = 25.00\%$ $PF_{26} = (8/26) * 100 = 30.76\%$	
	FE	$FE_{24} = (0/9) * 100 = 0\%$ $FE_{26} = (0/8) * 100 = 0\%$	
	FPE	$FPE_{24} = (1/9) * 100 = 11.11\%$ $FPE_{26} = (1/8) * 100 = 12.50\%$	

Tableau IV.7. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Qualité de vie	NES	$NES_{24} = 270/25 = 10.80$ $NES_{26} = 198/18 = 11.00$	<p>TO 0.5, MPA 0.7, NES 0.55 (Bât 26); TO 0.5, MPA 0.7, NES 0.54 (Bât 24)</p>
	MPA	$MPA_{24} = (1/36) * 100 = 2.77\%$ $MPA_{26} = (2/26) * 100 = 7.69\%$	
	TO	Les blocs sont de F3 donc : $TO_{24} = 36/7 = 5.1$ $TO_{26} = 26/6 = 4.33$	
Secourisme	DH, DPC, DPP	Zone urbaine Dref = 8 Km D = 3.7 Km	<p>DH 0.9, DPP 0.9, DPC 0.9 (both Bât 24 and Bât 26)</p>
Accessibilité	ACB	Moyenne	<p>ACB 0.4, ZL 0.5 (both Bât 24 and Bât 26)</p>
	ZL	Moyennement suffisante	

Tableau IV.8. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°01 (Suite)

Objectif	IPs	Valeur de calcul	Performance
VulnEnv	ZS	Bouira zone IIa moyenne sismicité	<p>ZS 0.6, Amoy 0.7, CCU 0.1, EM 1 (both Bât 24 and Bât 26)</p>
	Amoy	D'après le CRAAG	
	CCU	RPA 83	
	EM	D= 90 km donc D > 5 Km	

IV.3.2 Cas d'étude n°02

Tableau IV.9. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Stabilité de sol	SS	Alluvions	<p>0.7 SS 0.5 TS 0.9 PT 0.9 PE 0.9 PCP 0.1</p> <p>— Bât 19 — Bât 20</p>
	TS	Site meuble	
	PT	P<10%	
	PCP	D= 4m donc D <2H	
	PE	D>100m Bonne	
	PS	D=4m donc D > 2H	
Agressivité chimique	Sulf	L'agressivité chimique dans la zone de ville de Bouira est nulle selon les rapports de sol de laboratoire de l'habitation et de la construction	<p>Sulf 1 Mgnm 1 Amon 1 PH 1</p> <p>— Bât 19 — Bât 20</p>
	Magn		
	Ammon		
	PH		
Conception architecturale	RP	Bâtiment non régulier	<p>0.1 RP 1 EP 1 REL 1 ET 1 HB 0.5 PSR 0.9</p> <p>— Bât 19 — Bât 20</p>
	EP	Bâtiment non élancé	
	REL	Bâtiment régulier	
	ET	Absence de l'étage transparent	
	HB	H=3.06×10 =30.60m Zone II 20m< H<33m	
	PSR	Bonne	

Tableau IV.10. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Système structurel	SC	Zone IIa H>14 m donc mauvaise	<p>SC 0.1 1 PC 1 PEL 1 AC 0.9 CC 0.9 DC 0.9 BA 0.9</p> <p>— Bât 19 — Bât 20</p>
	PC	Absence du poteau court	
	PEL	Absence du poteau élancé	
	AC	Superposé et verticalement régulier	
	CC	Continuité des éléments et le transmet des charges	
	DC	Absence de forte différence	
	BA	D> 4 cm donc Bonne	

Tableau IV.11. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Etat de la structure	AB	$2022-2021=1 \text{ ans} < 10 \text{ ans}$	
	EC	Moyen	
	DS	Non	
	CNS	Non	
	PR	Non	
Âge	PA	$PA_{19} = (3/109)*100 = 2.75\%$ $PA_{20} = (2/129)*100 = 1.55\%$	
	RE	$RE_{19} = (40/109)*100 = 36.69\%$ $RE_{20} = (45/129)*100 = 34.88\%$	

Tableau IV.12. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Sexe	PF	$PF_{19} = (35/109)*100=32.11\%$ $PF_{20} = (42/129)*100 = 32.55\%$	
	FE	$FE_{19} = (6/35)*100 = 17.14\%$ $FE_{20} = (3/42)*100 = 7.14\%$	
	FPE	$FPE_{19} = (0/35)*100 = 0\%$ $FPE_{20} = (4/42)*100 = 9.52\%$	
Qualité de vie	NES	$NES_{19} = 646/69= 9.36$ $NES_{20} = 823/84=9.79$	
	MPA	$MPA_{19} = (0/109) * 100 = 0\%$ $MPA_{20} = (2/129) * 100 = 1.55\%$	
	TO	Les blocs sont de F3+F4 donc : $TO_{19} = 57/13 = 4.38$ $TO_{20} = 62/14 = 4.42$ $TO_{19} = 52/13 = 4$ $TO_{20} = 67/14 = 5.15$	

Tableau IV.13. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Qualité de vie	NES	$NES_{19} = 646/69 = 9.36$ $NES_{20} = 823/84 = 9.79$	
	MPA	$MPA_{19} = (0/109) * 100 = 0\%$ $MPA_{20} = (2/129) * 100 = 1.55\%$	
	TO	Les blocs sont de F3+F4 donc : $TO_{19} = 57/13 = 4.38$ $TO_{20} = 62/14 = 4.42$ $TO_{19} = 52/13 = 4$ $TO_{20} = 67/14 = 5.15$	
Secourisme	DH DPC DPP	Zone urbaine Dref = 8 Km D = 5.3 Km	
Accessibilité	ACB	Facile	
	ZL	Moyennement suffisante	

Tableau IV.14. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)

Objectif	IPs	Valeur de calcul	Performance
VulnEnv	ZS	Bouira zone IIa moyenne sismicité	
	Amoy	D'après le CRAAG	
	CCU	RPA 99 v2003	
	EM	D= 90 km donc D > 5 Km	

Tableau IV.15. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Stabilité de sol	SS	Alluvions	<p>0.7 SS 0.5 TS 0.9 PT 0.1 PCP 0.9 PE 0.9 PS</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
	TS	Site meuble	
	PT	P<10%	
	PCP	D= 4m donc D <2H	
	PE	D>100m Bonne	
	PS	D=4m donc D>2H	
Agressivité chimique	Sulf	L'agressivité chimique dans la zone de ville de Bouira est nulle selon les rapports de sol de laboratoire de l'habitation et de la construction	<p>Sulf 1 1 Mgnm 1 Amon 1 PH</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
	Magn		
	Ammon		
	PH		
Conception architectural	RP	Bâtiment non régulier	<p>0.1 RP 1 EP 1 REL 1 ET 0.5 HB 0.9 PSR</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
	EP	Bâtiment non élancé	
	REL	Bâtiment régulier	
	ET	Absence de l'étage transparent	
	HB	H=3.06×10 =30.60m Zone II 20m< H<33m	
	PSR	Bonne	

Tableau IV.16. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Système structurel	SC	Zone IIa H>14 m donc mauvaise	<p>SC 0.1 BA 0.9 PC 1 PEL 1 AC 0.9 CC 0.9 DC 0.9</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
	PC	Absence du poteau court	
	PEL	Absence du poteau élancé	
	AC	Superposé et verticalement régulier	
	CC	Continuité des éléments et le transmet des charges	
	DC	Absence de forte différence	
	BA	D> 4 cm donc Bonne	
Etat de la structure	AB	2022-2021= 1 ans < 10 ans	<p>AB 1 EC 0.7 DS 1 CNS 1 PR 1</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
	EC	Moyen	
	DS	Non	
	CNS	Non	
	PR	Non	
Âge	PA	$PA_{27} = (1/104)*100 = 0.96\%$ $PA_{28} = (/52)*100 = 0\%$	<p>PA 1 RE 0.5</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
	RE	$RE_{27} = (32/104)*100 = 30.76\%$ $RE_{28} = (24/52)*100 = 56.16\%$	

Tableau IV.17. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Sexe	PF	$PF_{27} = (28/104) * 100 = 26.92\%$ $PF_{28} = (14/52) * 100 = 26.92\%$	<p>PF 0.7</p> <p>1 0.9</p> <p>FPE 1 FE</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
	FE	$FE_{27} = (3/28) * 100 = 10.71\%$ $FE_{28} = (0/14) * 100 = 0\%$	
	FPE	$FPE_{27} = (0/28) * 100 = 0\%$ $FPE_{28} = (0/14) * 100 = 0\%$	
Qualité de vie	NES	$NES_{27} = (695/72) = 9.65$ $NES_{28} = (344/28) = 12.82$	<p>NES 0.48 0.61</p> <p>1 0.9</p> <p>TO 1 MPA</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
	MPA	$MPA_{27} = (1/104) * 100 = 0.96\%$ $MPA_{28} = (0/52) * 100 = 0\%$	
	TO	Les blocs sont de F3+F4 donc : $TO_{27} = 59/13 = 4.53$ $TO_{28} = 25/6 = 4.16$ $TO_{27} = 45/12 = 3.75$ $TO_{28} = 27/6 = 4.5$	
Secourisme	DH DPC DPP	Zone urbaine Dref = 8 Km D = 5.3 Km	<p>0.9 DH</p> <p>DPP 0.9 DPC 0.9</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
Accessibilité	ACB	Facile	<p>ACB 0.7</p> <p>0.5 ZL</p> <p>— Bât 27 — Bât 28</p>
	ZL	Moyennement suffisante	

Tableau IV.18. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°02 (Suite)

Objectif	IPs	Valeur de calcul	Performance
VulnEnv	ZS	Bouira zone IIa moyenne sismicité	<p>Detailed description: A radar chart with four axes representing IP categories: ZS (top), Amoy (right), CCU (bottom), and EM (left). Two data series are plotted: Bât 27 (orange line with diamond markers) and Bât 28 (blue line with square markers). The values for Bât 27 are: ZS=0.6, Amoy=0.85, CCU=1, EM=1. The values for Bât 28 are: ZS=0.6, Amoy=0.85, CCU=1, EM=1. A legend at the bottom indicates Bât 27 (orange diamond) and Bât 28 (blue square).</p>
	Amoy	D'après le CRAAG	
	CCU	RPA 99 v2003	
	EM	D= 90 km donc D > 5 Km	

IV.3.3 Cas d'étude n°03

Tableau IV.19. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°03

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Stabilité de sol	SS	Ancien marais	<p>Detailed description: A radar chart with six axes representing IP categories: SS (top), TS (top-right), PT (right), PCP (bottom-right), PE (bottom-left), and PS (left). Two data series are plotted: Bât A (orange line with diamond markers) and Bât B (blue line with square markers). The values for Bât A are: SS=0.1, TS=0.5, PT=0.7, PCP=0.1, PE=0.1, PS=0.1. The values for Bât B are: SS=0.1, TS=0.5, PT=0.7, PCP=0.1, PE=0.1, PS=0.1. A legend at the bottom indicates Bât A (orange diamond) and Bât B (blue square).</p>
	TS	Site meuble	
	PT	10% < P < 20%	
	PCP	D= 4m donc D < 2H	
	PE	D=5m donc D < 100m mauvais	
	PS	D=4m donc D < 2H	
Agressivité chimique	Sulf	Faible	<p>Detailed description: A radar chart with four axes representing IP categories: Sulf (top), Mgnm (right), Amon (bottom), and PH (left). Two data series are plotted: Bât A (orange line with diamond markers) and Bât B (blue line with square markers). The values for Bât A are: Sulf=0.8, Mgnm=1, Amon=1, PH=faible. The values for Bât B are: Sulf=0.8, Mgnm=1, Amon=1, PH=faible. A legend at the bottom indicates Bât A (orange diamond) and Bât B (blue square).</p>
	Magn	nulle	
	Ammon	nulle	
	PH	faible	
Conception architecturale	RP	Bâtiment régulier	<p>Detailed description: A radar chart with six axes representing IP categories: RP (top), EP (top-right), REL (right), ET (bottom-right), HB (bottom-left), and PSR (left). Two data series are plotted: Bât A (orange line with diamond markers) and Bât B (blue line with square markers). The values for Bât A are: RP=1, EP=1, REL=1, ET=1, HB=0.7, PSR=0.9. The values for Bât B are: RP=1, EP=1, REL=1, ET=1, HB=0.7, PSR=0.9. A legend at the bottom indicates Bât A (orange diamond) and Bât B (blue square).</p>
	EP	Bâtiment non élancé	
	REL	Bâtiment régulier	
	ET	Absence de l'étage transparent	
	HB	H=3.06*4+4.08 =16.32m Zone II Lim < H < 20m	
	PSR	Bonne	

Tableau IV.20. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°03 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Système structurel	SC	Zone IIa H>14 m donc mauvaise	<p>SC 0.1 BA 0.1 PC 1 PEL 1 AC 0.9 CC 0.9 DC 0.9 Bât A (orange) Bât B (blue)</p>
	PC	Absence du poteau court	
	PEL	Absence du poteau élancé	
	AC	Superposé et verticalement régulier	
	CC	Continuité des éléments et le transmet des charges	
	DC	Absence de forte différence	
	BA	D< 4 cm donc Mauvais	
Etat de la structure	AB	2022-2010= 12ans 10-30 ans	<p>AB 0.85 PR 1 EC 0.7 DS 1 CNS 1 Bât A (orange) Bât B (blue)</p>
	EC	Moyen	
	DS	Non	
	CNS	Non	
	PR	Oui	
Âge	PA	$PA_A = (3/93)*100=3.22\%$ $PA_B = (3/75)*100 = 4.00\%$	<p>PA 0.9 RE 0.9 Bât A (orange) Bât B (blue)</p>
	RE	$RE_{27} = (16/93)*100 =17.20\%$ $RE_{28} = (18/75)*100 = 24.00\%$	
Sexe	PF	$PF_A = (35/93)*100=37.63\%$ $PF_B = (25/75)*100 = 33.33\%$	<p>PF 0.7 FE 0.9 FP 0.9 Bât A (orange) Bât B (blue)</p>
	FE	$FE_A = (2/18)*100=11.11\%$ $FE_B = (1/25)*100 = 4.00\%$	
	FPE	$FPE_A = (6/18)*100=33.33\%$ $FPE_B = (9/25)*100 = 36.00\%$	

Tableau IV.21. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°03 (Suite)

Critère	IPs	Valeur de calcul	Performance
Qualité de vie	NES	$NES_A = 745/75 = 9.93$ $NES_B = (616/57) = 10.80$	
	MPA	$MPA_A = (3/93) * 100 = 3.22\%$ $MPA_B = (10/75) * 100 = 13.33\%$	
	TO	Les blocs sont de F2+F3 donc : $TO_A = 40/8 = 5$ $TO_B = 36/6 = 6$ $TO_A = 53/8 = 6.62$ $TO_B = 44/8 = 5.5$	
Secourisme	DH DPC DPP	Zone rural Dref = 13 Km D = 17.2 Km	
Accessibilité	ACB	Facile	
	ZL	Moyennement suffisante	

Tableau IV.22. Calcul et évaluation des performances des IPs – Cas d'étude n°03 (Suite)

Objectif	IPs	Valeur de calcul	Performance
VulnEnv	ZS	Bouira zone IIa moyenne sismicité	
	Amoy	D'après le CRAAG	
	CCU	RPA 99 v2003	
	EM	D= 90 km donc D > 5 Km	

IV.4 Pondération des IPs – Utilisation de la méthode AHP

La pondération des IPs ainsi que des autres paramètres de la méthodologie consiste en le calcul des coefficients poids désignant l'ordre de contribution de chacun de ces paramètres à la solution finale. Dans notre étude, les coefficients de pondération (poids) sont calculés à l'aide de la méthode AHP.

IV.4.1 Exemple d'application : Pondération des IPs du critère Sexe

A. Etape 1 : Hiérarchisation des IPs par importance

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

IP de degrés 1 (FPE) \Rightarrow IP de degrés 2 (FE) \Rightarrow IP de degrés 3 (PF)

Deuxièmement : On attribue à chaque IPs un ordre de préférence à partir du Tableau IV.23 pour construire une matrice appelée « Matrice de décision ».

Tableau IV.23. Attribution des ordres des 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 : $A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$

B. Etape 2 : Détermination des poids associés à chaque IPs

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

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

C. Etape 3 : Vérification de la consistance des résultats

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

Et :
$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.0720 \\ 3.0330 \\ 3.0112 \end{bmatrix}$$
 Alors :
$$\lambda_{\max} = \frac{3.0720+3.0330+3.0387}{3} = 3.0387$$
 CI =
$$\frac{3.0387-3}{2} = 0.0194$$

Enfinement :
$$CR = \frac{0.0194}{0.58} = 0.0334 < 0.10 \rightarrow$$
 l'attribution des poids est acceptable

IV.4.2 Synthèse des calculs des poids des IPs

Tableau IV.24.Synthèse des calculs des poids des IPs

Classification des IPs	Matrice de décision	W _i	λ'	λ	λ _{max}	CI	RI	CR																																																	
1-Type du site 2-Sol en surface 3-Pente générale du terrain 4-Proximité d'un changement de pente 5-Proximité d'eau 6-Proximité de soutènement	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>7</td><td>9</td><td>9</td></tr> <tr><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>7</td><td>7</td></tr> <tr><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/7</td><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/9</td><td>1/7</td><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>1/9</td><td>1/7</td><td>1/5</td><td>1/5</td><td>1/2</td><td>1</td></tr> </table>	1	3	5	7	9	9	1/3	1	3	5	7	7	1/5	1/3	1	3	5	5	1/7	1/5	1/3	1	3	5	1/9	1/7	1/5	1/3	1	2	1/9	1/7	1/5	1/5	1/2	1	0.4583 0.2516 0.1379 0.0836 0.0395 0.0292	3.1055 1.7166 0.9075 0.5096 0.2401 0.1801	6.7765 6.8224 6.5822 6.0967 6.0772 6.1768	6.4220	0.0844	1.24	0.0681													
1	3	5	7	9	9																																																				
1/3	1	3	5	7	7																																																				
1/5	1/3	1	3	5	5																																																				
1/7	1/5	1/3	1	3	5																																																				
1/9	1/7	1/5	1/3	1	2																																																				
1/9	1/7	1/5	1/5	1/2	1																																																				
1-Sulfate 2-Magnésium 3-Ammonium 4-Potentiel hydrogène	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.25 0.25 0.25 0.25	Vérification non nécessaire																																						
1	1	1	1																																																						
1	1	1	1																																																						
1	1	1	1																																																						
1	1	1	1																																																						
1-Régularité en plan 2-Régularité en élévation 3-Etage à hauteur différentes 4-Elancement en plan 5-Parties saillantes ou rentrantes 6-Hauteur de bâtiment	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr> <tr><td>1/3</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/5</td><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>1/6</td><td>1/6</td><td>1/4</td><td>1/2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>1/7</td><td>1/7</td><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1/2</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	3	5	6	7	1	1	3	5	6	7	1/3	1/3	1	3	4	5	1/5	1/5	1/3	1	2	3	1/6	1/6	1/4	1/2	1	2	1/7	1/7	1/5	1/3	1/2	1	0.3356 0.3356 0.1617 0.0789 0.0524 0.0357	2.1154 2.1154 1.0104 0.4790 0.3156 0.2165	6.3030 6.3030 6.2476 6.0698 6.0235 6.0601	6.1678	0.0336	1.24	0.0271													
1	1	3	5	6	7																																																				
1	1	3	5	6	7																																																				
1/3	1/3	1	3	4	5																																																				
1/5	1/5	1/3	1	2	3																																																				
1/6	1/6	1/4	1/2	1	2																																																				
1/7	1/7	1/5	1/3	1/2	1																																																				
1-Système de contreventement 2-Alignement des éléments verticaux de contreventement 3-Continuité des éléments de contreventement en hauteur 4-Forte différence de contreventement 5- Bâtiments accolés avec joint insuffisant ou obstrué 6- Poteaux élancés 7- Poteaux courts	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>5</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr> <tr><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td><td>5</td><td>7</td><td>8</td></tr> <tr><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr> <tr><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td><td>7</td></tr> <tr><td>1/7</td><td>1/5</td><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/8</td><td>1/7</td><td>1/6</td><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>1/9</td><td>1/8</td><td>1/7</td><td>1/7</td><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td></tr> </table>	1	3	5	5	7	8	9	1/3	1	3	3	5	7	8	1/5	1/3	1	3	5	6	7	1/5	1/3	1/3	1	3	5	7	1/7	1/5	1/5	1/3	1	3	5	1/8	1/7	1/6	1/5	1/3	1	3	1/9	1/8	1/7	1/7	1/5	1/3	1	0.3963 0.2224 0.1576 0.1074 0.0605 0.0347 0.0211	3.2798 1.8641 1.2920 0.8165 0.4388 0.2474 0.1545	8.2766 8.3807 8.2003 7.6052 7.2527 7.1215 7.3072	7.7349	0.1225	1.32	0.0928
1	3	5	5	7	8	9																																																			
1/3	1	3	3	5	7	8																																																			
1/5	1/3	1	3	5	6	7																																																			
1/5	1/3	1/3	1	3	5	7																																																			
1/7	1/5	1/5	1/3	1	3	5																																																			
1/8	1/7	1/6	1/5	1/3	1	3																																																			
1/9	1/8	1/7	1/7	1/5	1/3	1																																																			

Tableau IV.25.Synthèse des calculs des poids des IPs (Suite)

Classification des IPs	Matrice de décision	W_i	λ'	λ	λ_{max}	CI	RI	CR																									
2-Désordres structuraux constatés 3-Risque de chute des éléments non structuraux 4-Etat général de conservation 5-Age du bâtiment (année de construction) 6-Projet de réhabilitation et/ou d'entretien pour les anciens bâtiments	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>7</td></tr> <tr><td>1/3</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/4</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>1/7</td><td>1/5</td><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td></tr> </table>	1	3	4	5	7	1/3	1	2	5	5	1/4	1/3	1	3	5	1/5	1/3	1/3	1	3	1/7	1/5	1/5	1/3	1	0.4646 0.2596 0.1585 0.0779 0.0394	2.5428 1.3968 0.8351 0.3938 0.2005	5.4735 5.3797 5.2693 5.0536 5.0906	5.2533	0.0633	1.12	0.0565
1	3	4	5	7																													
1/3	1	2	5	5																													
1/4	1/3	1	3	5																													
1/5	1/3	1/3	1	3																													
1/7	1/5	1/5	1/3	1																													
1-Ratio de la population âgée > 65 ans 2-Ratio d'enfants < 15 ans	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>1/2</td><td>1</td></tr> </table>	1	2	1/2	1	0.667 0.333	Vérification non nécessaire																										
1	2																																
1/2	1																																
1-Femmes avec plus de 5 enfants 2-Femmes enceintes 3-Ratio de la population féminine	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td></tr> </table>	1	3	5	1/3	1	3	1/5	1/3	1	0.6333 0.2605 0.1062	1.9456 0.7901 0.3197	3.0720 3.0330 3.0112	3.0387	0.0194	0.58	0.0334																
1	3	5																															
1/3	1	3																															
1/5	1/3	1																															
1-Taux d'occupation du logement 2-Mobilité physique des occupants 3-Niveau d'éducation et de sensibilisation	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td></tr> </table>	1	3	5	1/3	1	3	1/5	1/3	1	0.6333 0.2605 0.1062	1.9456 0.7901 0.3197	3.0720 3.0330 3.0112	3.0387	0.0194	0.58	0.0334																
1	3	5																															
1/3	1	3																															
1/5	1/3	1																															
1-Distance aux hôpitaux 2-Distance aux postes de protection civile 3-Distance aux postes de police	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td></tr> </table>	1	2	5	1/2	1	3	1/5	1/3	1	0.5813 0.3092 0.1096	1.7475 0.9285 0.3289	3.0064 3.0035 3.0012	3.0037	0.0018	0.58	0.0032																
1	2	5																															
1/2	1	3																															
1/5	1/3	1																															
1-Accessibilité au bâtiment 2-Présence de zones libre et dégagé à l'extérieur du bâtiment	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>1/3</td><td>1</td></tr> </table>	1	3	1/3	1	0.75 0.25	Vérification non nécessaire																										
1	3																																
1/3	1																																
1-Zonage sismique 2-Valeurs moyennes d'accélération pour les séismes 3-Code de construction utilisée 4-Eloignement de bâtiment par rapport à la mer	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>7</td></tr> <tr><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td><td>5</td></tr> <tr><td>1/4</td><td>1/3</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>1/7</td><td>1/5</td><td>1/3</td><td>1</td></tr> </table>	1	3	4	7	1/3	1	3	5	1/4	1/3	1	3	1/7	1/5	1/3	1	0.5396 0.2715 0.1315 0.0573	2.2816 1.1325 0.5289 0.2326	4.2279 4.1707 4.0233 4.0556	4.1194	0.0398	0.90	0.0442									
1	3	4	7																														
1/3	1	3	5																														
1/4	1/3	1	3																														
1/7	1/5	1/3	1																														

IV.4.3 Synthèse des calculs des poids des critères

Tableau IV.26.Synthèse des calculs des poids des critères

Classification des IPs	Matrice de décision	W _i	λ'	λ	λ _{max}	CI	RI	CR
1-Stabilité de sol	1 3	0.75	Vérification non nécessaire					
2-Agressivité chimique	1/3 1	0.25						
1-Secourisme	1 3 3 5 5	0.430	2.418	5.6232	5.3630	0.09075	1.12	0.0810
2-Qualité de vie	1/3 1 3 5 5	0.281	1.569	5.5836				
3-Accessibilité	1/3 1/3 1 3 3	0.150	0.8039	5.3593				
4-Sexe	1/5 1/5 1/3 1 3	0.086	0.4371	5.0825				
5-Âge	1/5 1/5 1/3 1/3 1	0.053	0.2738	5.1672				

Tableau IV.27.Synthèse des calculs des poids des critères (Suite)

Classification des IPs	Matrice de décision	W _i	λ'	λ	λ _{max}	CI	RI	CR
1-Système structurel	1 3 5	0.6333	1.9456	3.0720	3.0387	0.0194	0.58	0.0334
2-Conception architecturale	1/3 1 3	0.2605	0.7901	3.0330				
3-Etat de la structure	1/5 1/3 1	0.1062	0.3197	3.0112				

IV.4.4 Synthèse des calculs des poids des objectifs

Tableau IV.28.Synthèse des calculs des poids des objectifs

Classification des IPs	Matrice de décision	W _i	λ'	λ	λ _{max}	CI	RI	CR
1-Vulnérabilité de la structure	1 2 3 5	0.456	1.9	4.1667	4.1647	0.061	0.90	0.0677
2-Vulnérabilité de sol	1/2 1 3 5	0.324	1.348	4.1604				
3-Vulnérabilité social	1/3 1/3 1 3	0.152	0.616	4.0526				
4-Vulnérabilité environnementale	1/5 1/5 1/3 1	0.068	0.274	4.0294				

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).

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

Nous avons utilisé la visualisation des résultats par l'interface du logiciel Visual Basic dans le but de simplifier la lecture et la structure hiérarchique du problème. Les résultats obtenus sont montrés par les Figures IV.7 – IV.16.

IV.5.1 Cas d'étude n°01

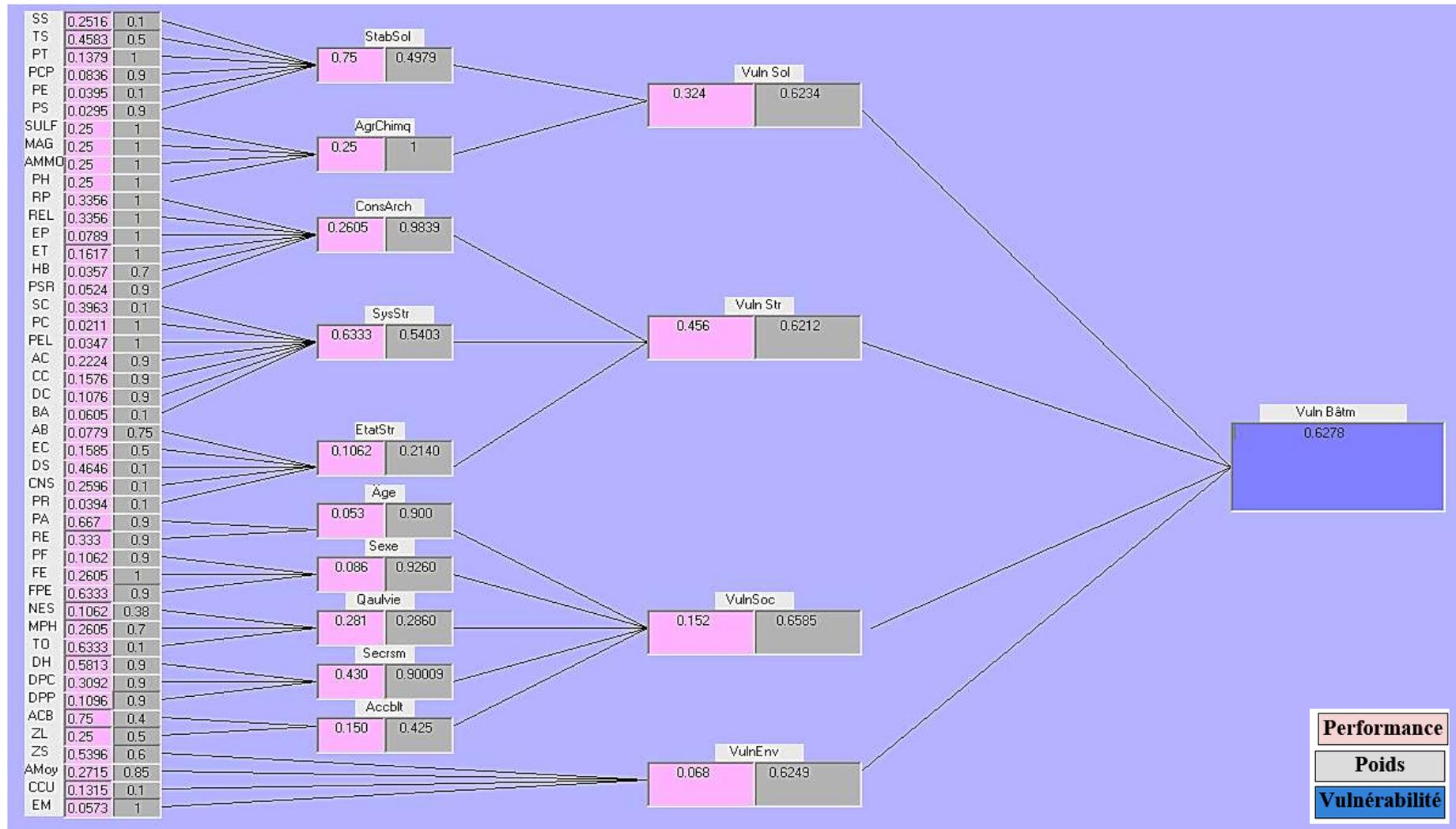


Figure IV.7. Evaluation des performances du cas d'étude n°01 (Bâtiment 8)

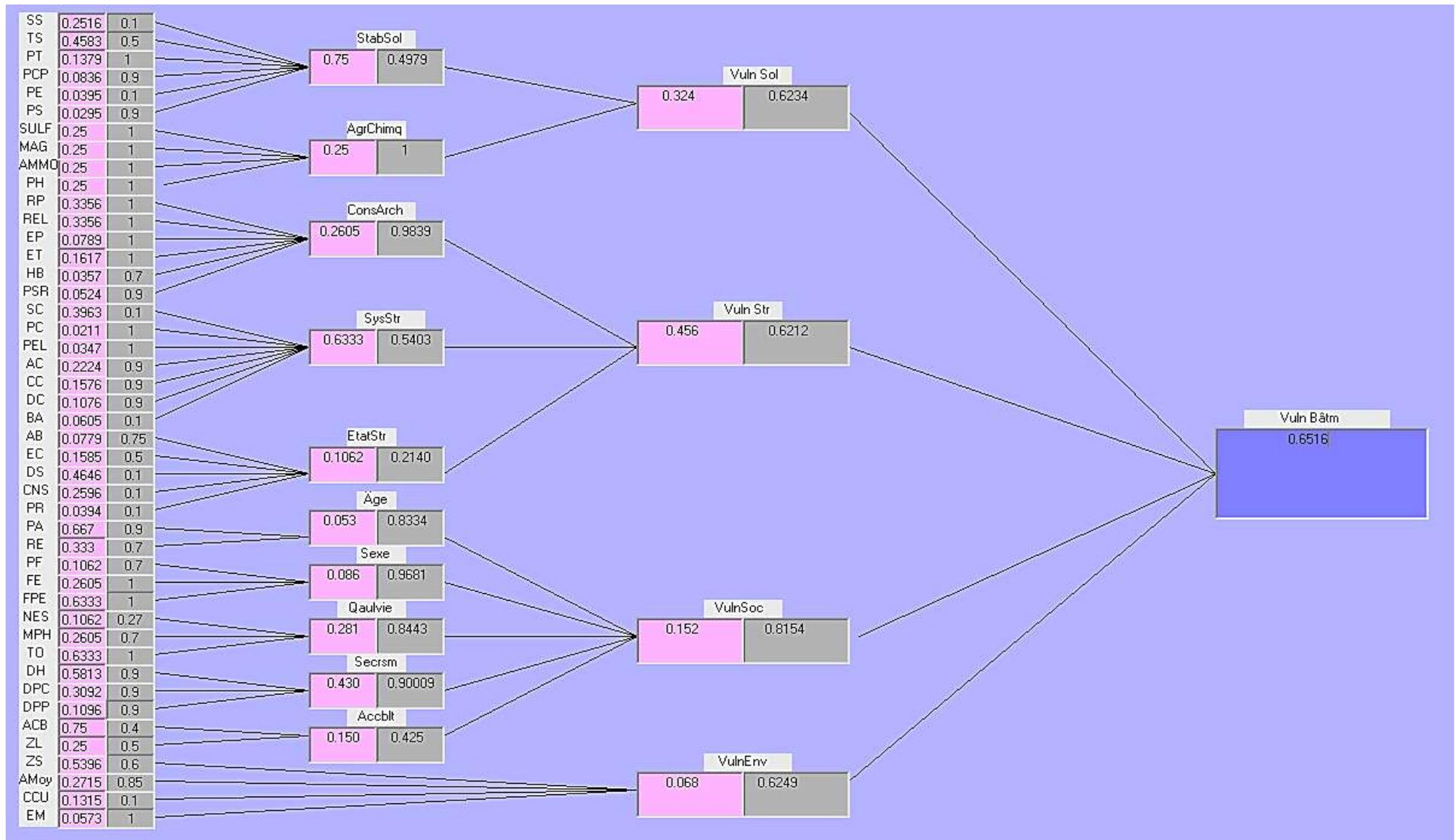


Figure IV.8. Evaluation des performances du cas d'étude n°01 (Bâtiment 9)

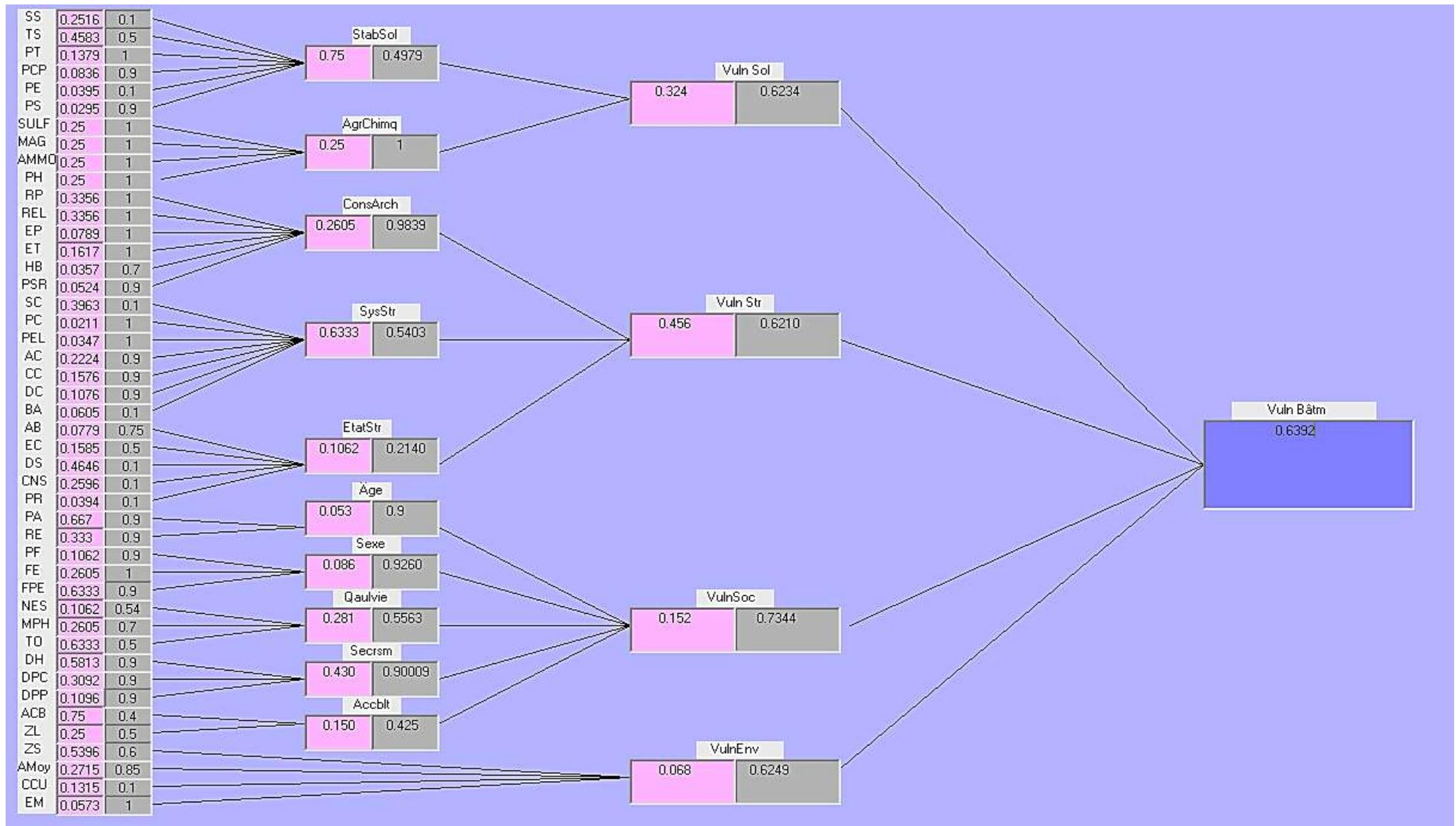


Figure IV.9. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 24)

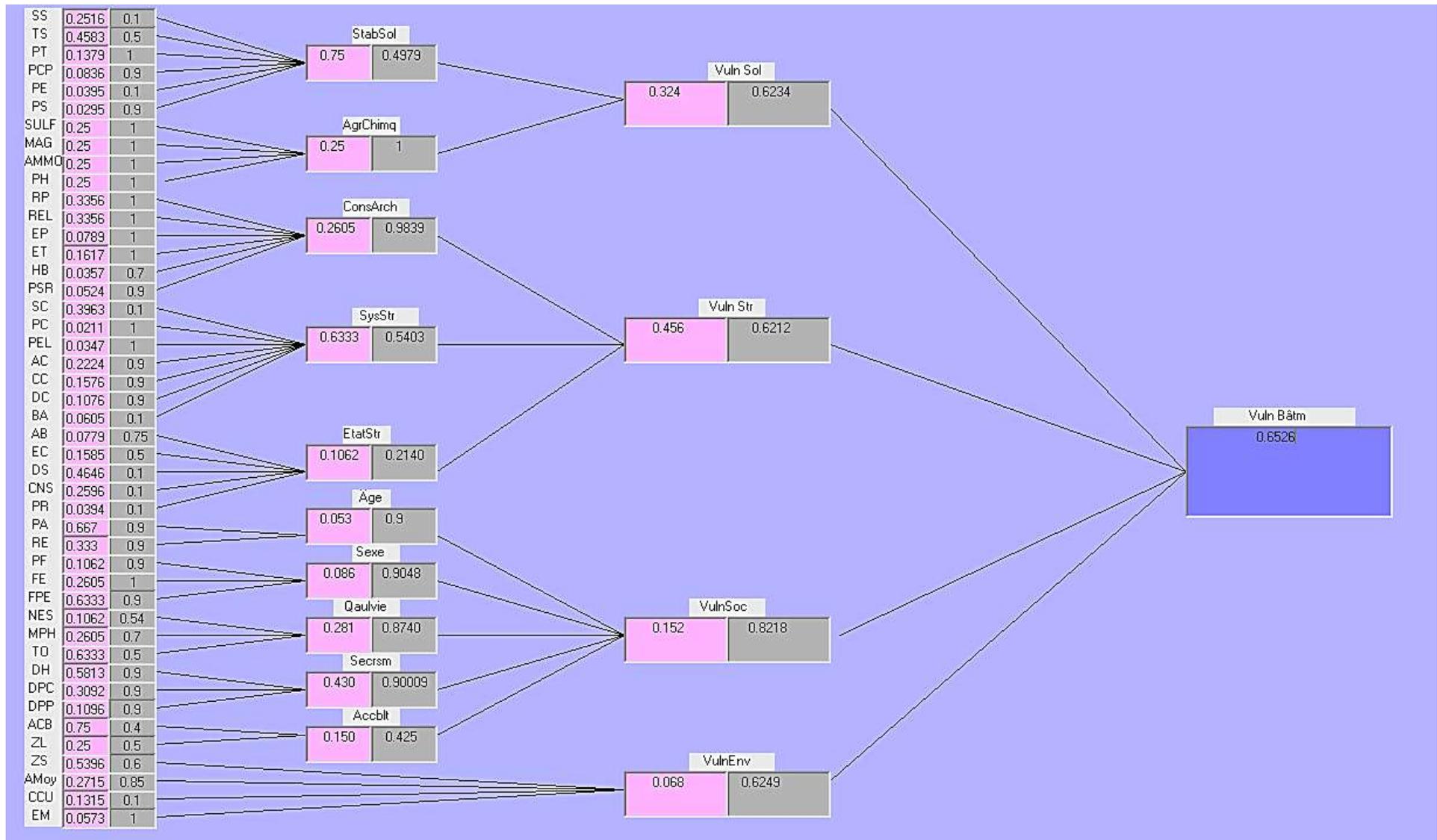


Figure IV.10. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 26)

IV.5.2 Cas d'étude n°02

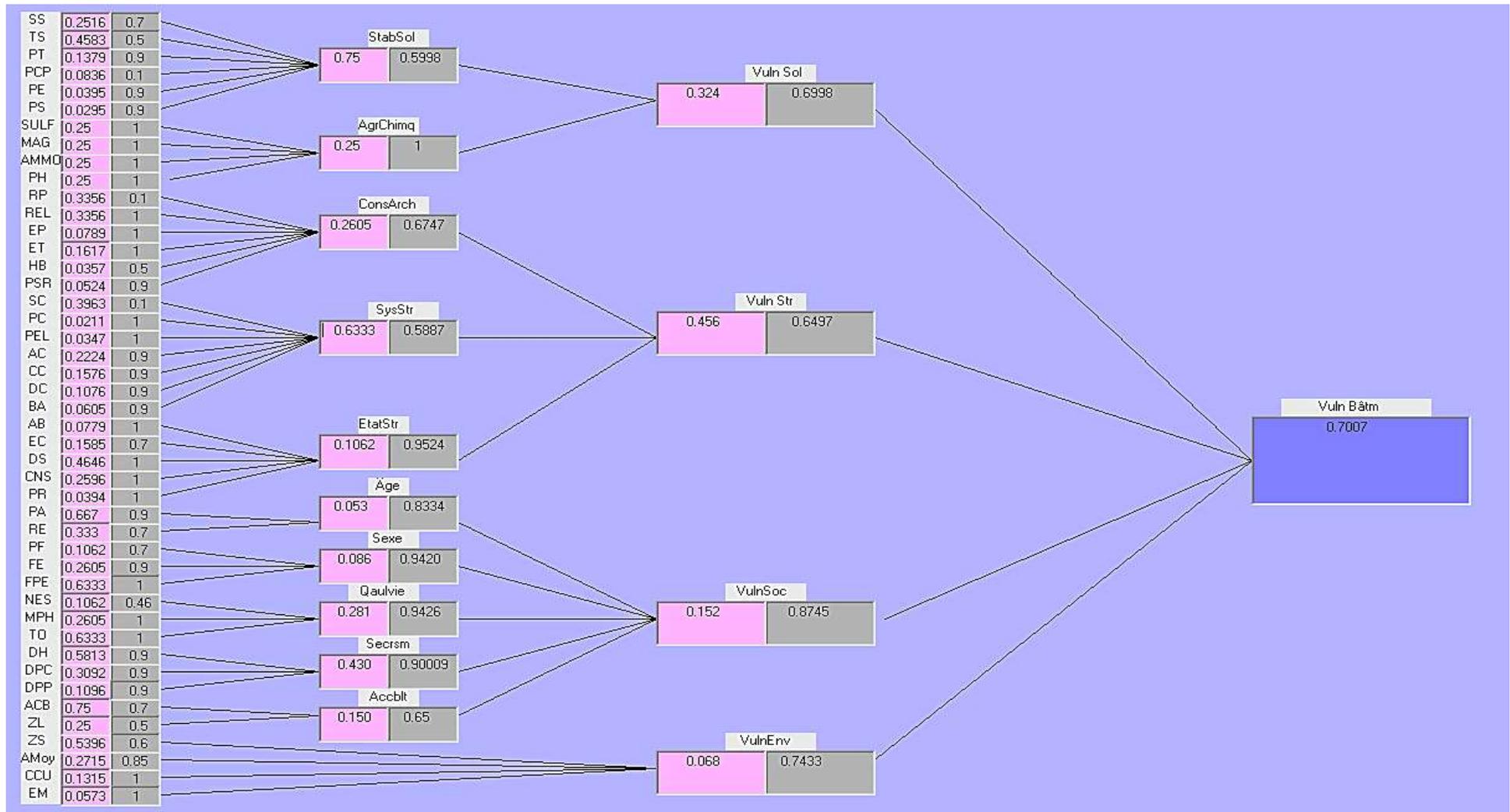


Figure IV.11. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 19)

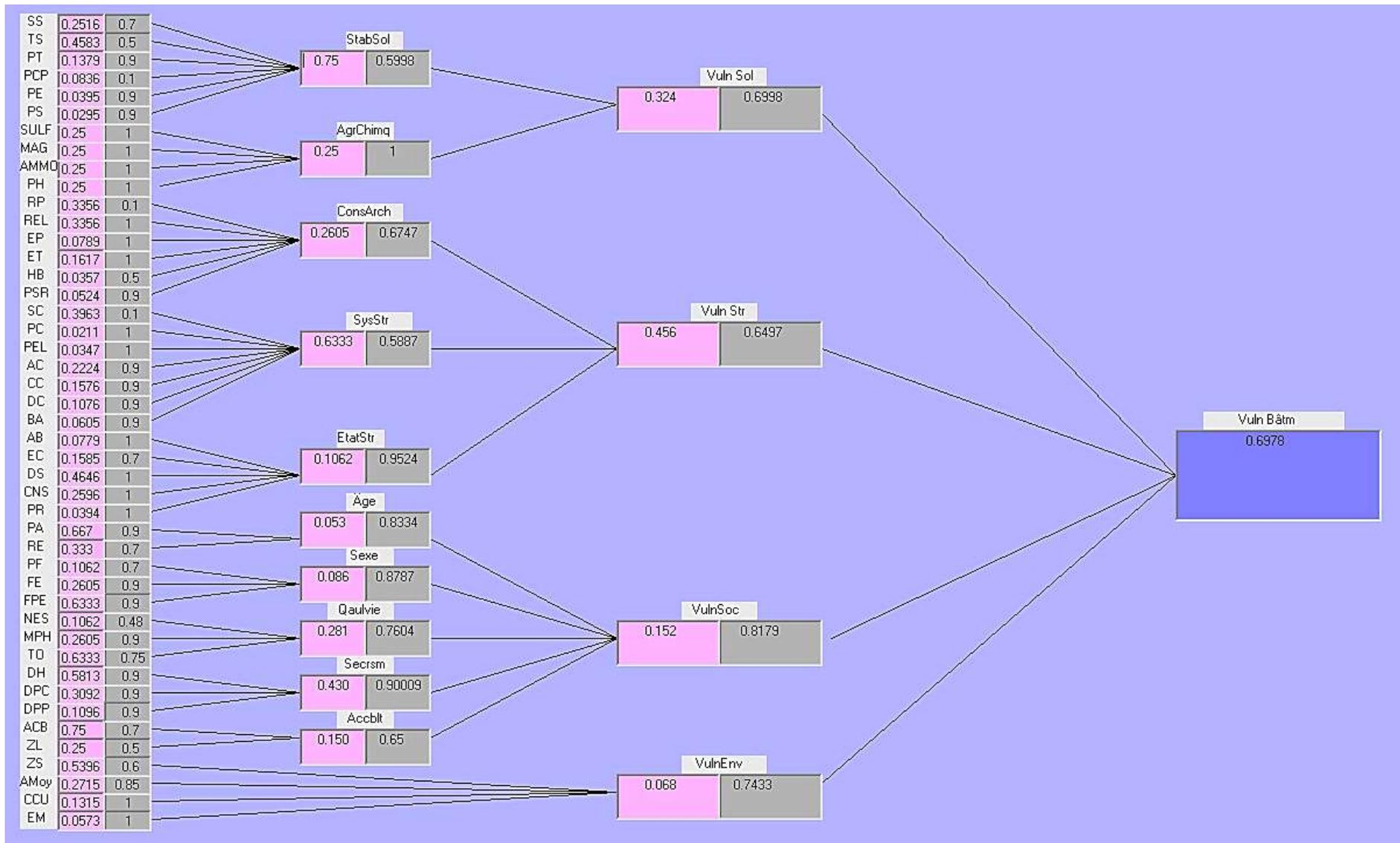


Figure IV.12. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 20)

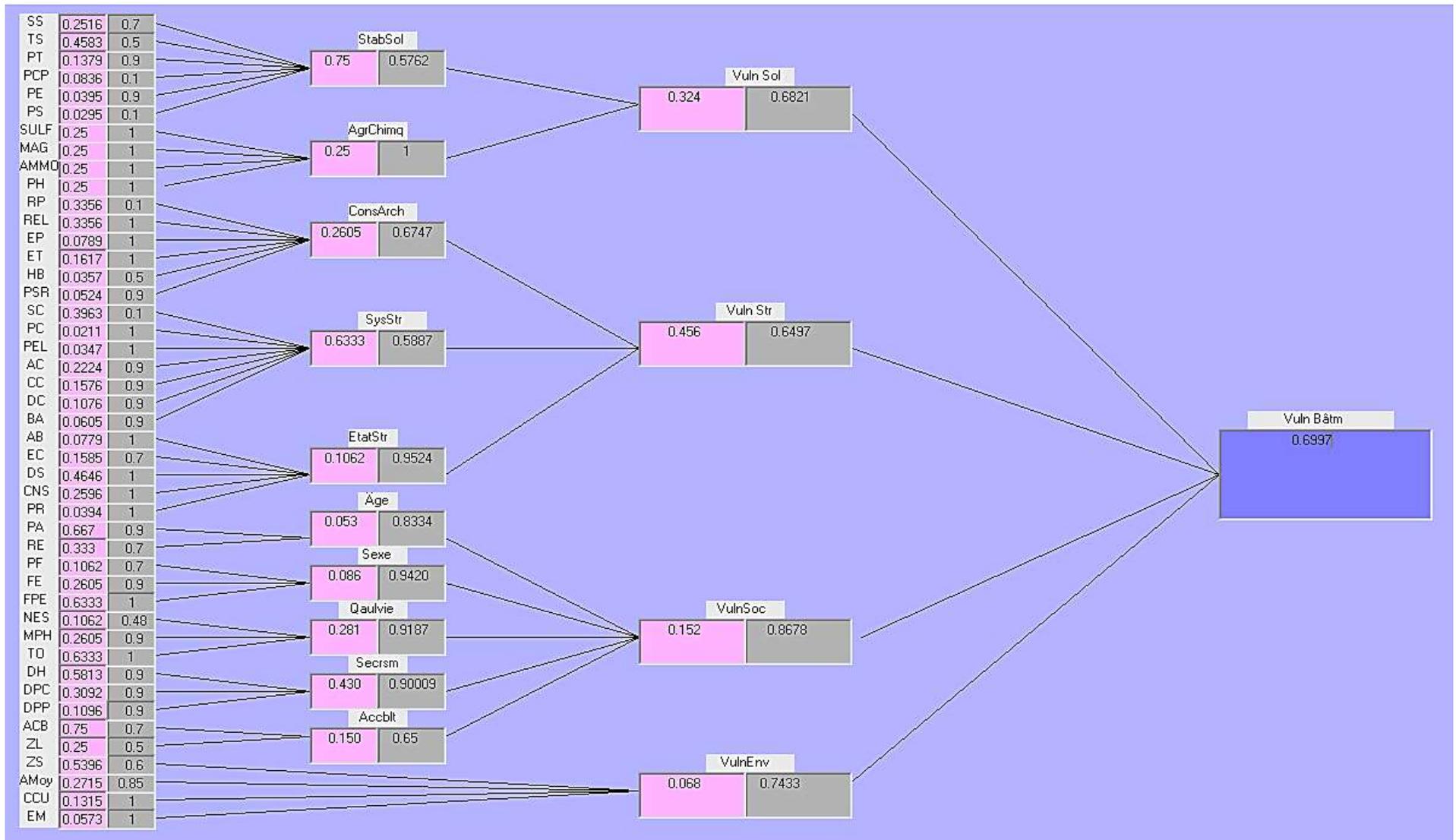


Figure IV.13. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 27)

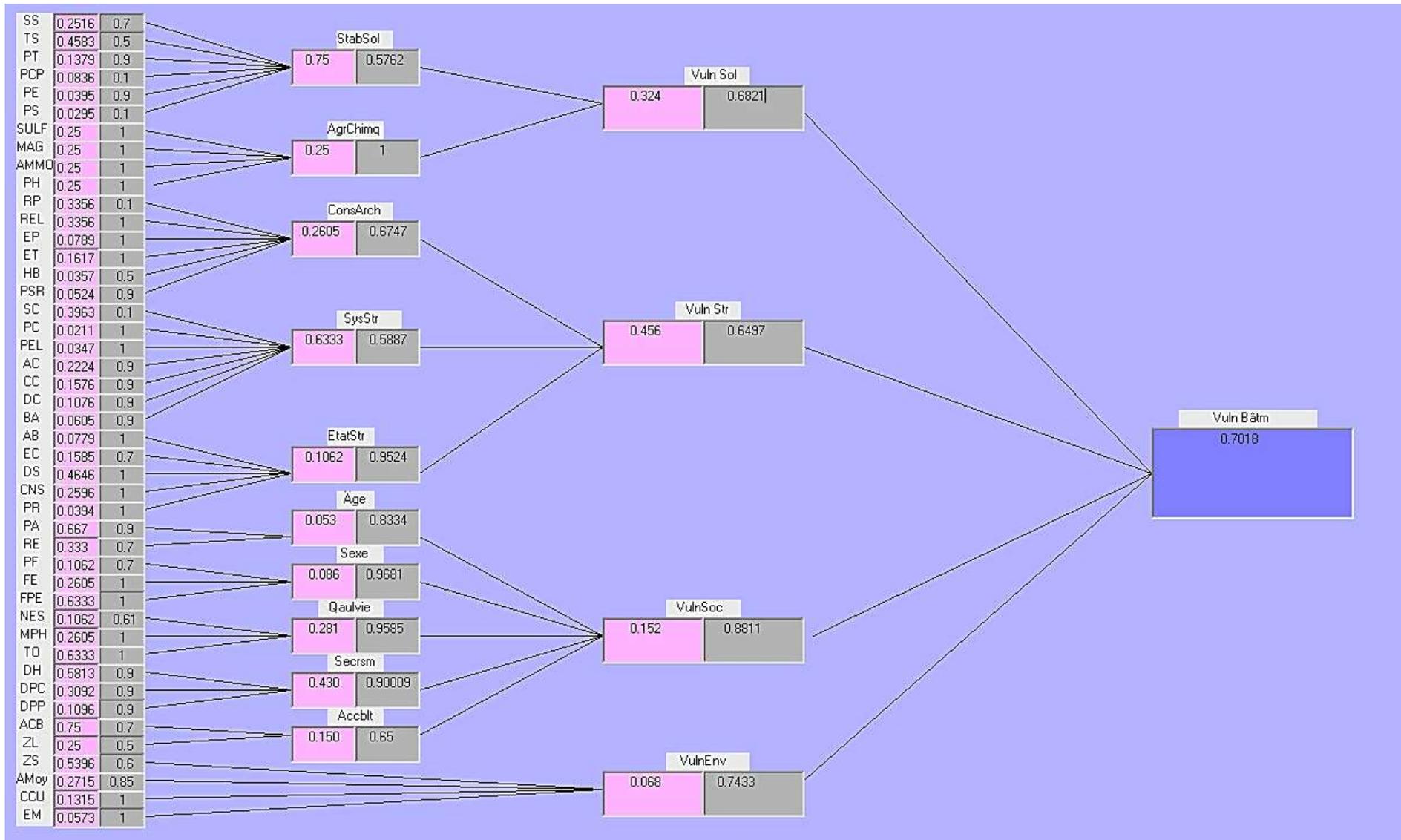


Figure IV.14. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment 28)

IV.5.3 Cas d'étude n°03

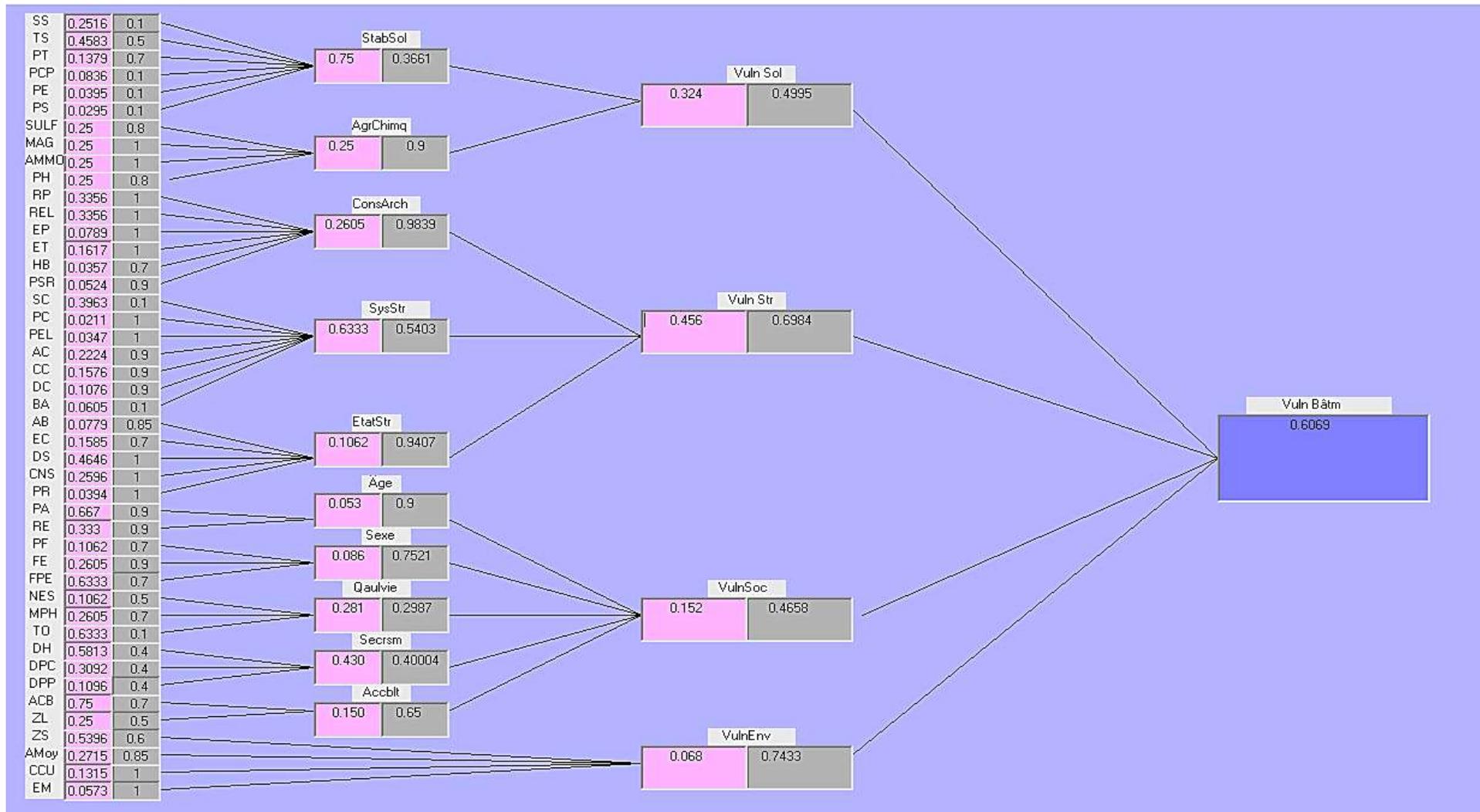


Figure IV.15. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment A)

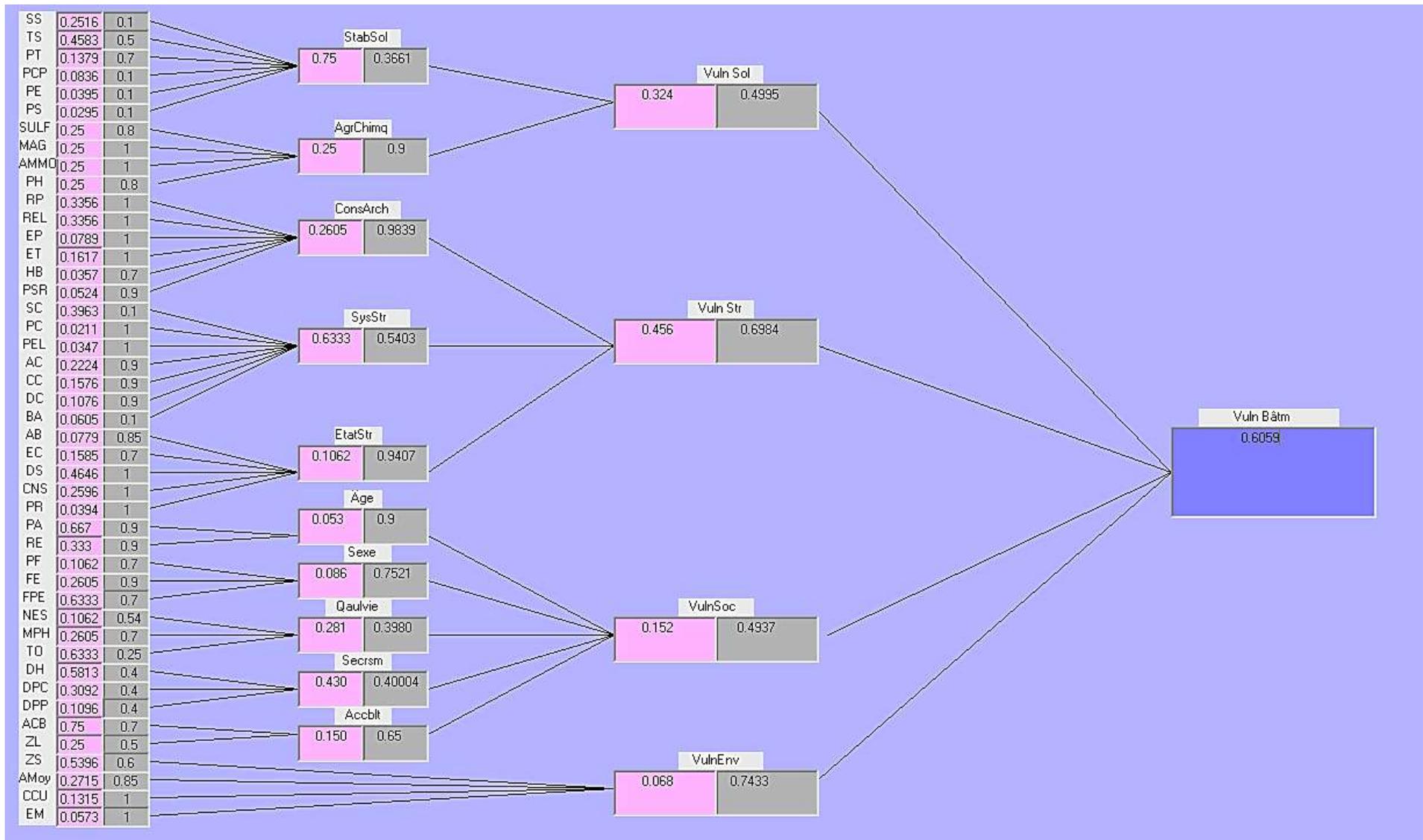


Figure IV.16. Evaluation des performances du cas d'étude n°02 (Bâtiment B)

IV.6 Discussions des résultats obtenus

IV.6.1 Pondérations des IPs

A. Pondération des IPs du critère « StabSol »

Pour le cas des IPs de ce critère, nous avons préférés l'IP « type de site » du fait de sa plus grande importance. En effet, la catégorie de sol comporte les éléments définissant la résistance du sol ainsi que de son classement. Ensuite, nous avons préférés « sol en surface » du fait de sa ressemblance au premier. En d'autre terme, les deux IPs définissent la même notion : celle du type de sol. L'IP « pente générale du terrain » est plus important que les trois derniers, puisqu'il implique la prise en compte du relief du terrain qui aussi impacte le choix de la structure. Les trois derniers, et du fait qu'ils prennent en considérant la proximité de la structure à un danger particulier ont été pondéré avec la même importance.

B. Pondération des IPs du critère « AgrChim »

Les quatre IPs définissant ce critère ont été classées de même importance du fait qu'ils définissent le même ordre de grandeur d'agressivité chimique.

C. Pondération des IPs du critère « ConcArch »

Lors de la pondération des IPs de ce critère, nous avons préféré les régularités en plan et en élévation. Ces deux IPs ont une importance considérable quant au comportement de l'ouvrage lors d'un séisme (la géométrie définit le centre de torsion et centre de gravité). L'IP « étage à hauteur différents » (saut de rigidité) est aussi une irrégularité en élévation tenant compte de la différence de rigidité. Les trois IPs restants ont presque la même pondération puisqu'ils définissent les aspects de la mauvaise conception parasismique.

D. Pondération des IPs du critère « SysStr »

Ce critère a été difficile à classer, du fait du nombre importants d'IPs entrant dans son évaluation et du rapprochement de l'importance de chaque indicateur.

L'IP « SysCont » est le premier dans notre liste car il est l'élément le plus important dans la construction en zone sismique. L'alignement des éléments de contreventements est aussi un paramètre de la conception très importante puisque si les éléments ne sont pas linéaire, ceci pourrait provoquer des moments de torsion lors de secousse. Les deux IPs « continuité des

éléments de contreventement » et « forte différence de contreventement » définissent la même notion, celle de la maîtrise du centre de torsion. En effet la continuité du contreventement en hauteur et une notion proche de la forte différence (rupture de contreventement, etc.). Le joint sismique est dans notre réflexion, plus important que les deux dernier IPs. Les deux IPs restants relèvent de la mauvaise conception parasismique, c'est pour cette raison qu'ils ont la même pondération.

E. Pondération des IPs du critère « EtatStr

Pour les IPs de ce critère, nous avons préféré l'indicateur « Désordres structuraux constaté » car il est l'élément plus important pour l'évaluation des bâtiments en termes de dommages apparents. Les IPs « Risque de chute des éléments non structuraux » et « Etat de conservation » définissent presque la même notion de danger pouvant survenir aux éléments de construction non structuraux lors d'un séisme.

F. Pondération des IPs du critère « Âge »

Les deux IPs de ce critère définissent presque la même notion, mais l'IP « Ration de la population âgée > 65 ans plus important que la Ration d'enfants en terme de poids.

G. Pondération des IPs du critère « Sexe »

Lors de la pondération des IPs de ce critère, nous avons favorisée les femmes avec plus de cinq enfants aux autres IPs, du fait que la population féminine étant seule vulnérable d'autant plus qu'avec 5 enfants à sauver. Ensuite, l'IP « Femmes enceints » est important que « Ration de la population féminine » car elles sont déjà dans une situation difficile.

H. Pondération des IPs du critère « Qualvie »

Dans ce critère, nous avons préféré l'IP « aux d'occupation de logement » du fait qu'il est l'un des IPs le plus important, car il pose un problème majeur en cas de danger et de panique (création d'un mouvement de foule encombrant les issues). L'IP « Mobilité physique des occupantes » est également important, car les personnes handicapées sont difficiles à les faire sortir. Enfin, le niveau d'éducation et de sensibilisation joue un rôle important dans le comportement des individus lors d'accidents.

I. Pondération des IPs du critère « Secrsm »

Nous avons préféré dans ce critère l'indicateur « Distance aux hôpitaux » par rapport au « Pompiers » en raison de son importance pour la sauvegarde des vies humaines, car lors d'une catastrophe, les victimes peuvent être transportées à l'hôpital même avant l'arrivée de la protection civile. Ensuite, nous avons favorisé « Distance aux poste de la protection civil » à « Distance aux poste police » car celle-ci est plus préparée aux événements tragiques.

A. Pondération des IPs du critère « Accblt »

Il est clair dans ce critère, que « Accessibilité aux bâtiments » est plus importante que « Présente de zones libre » car un accès facile au bâtiment permettrait aux résidents de sauver leur vie en cas de séisme.

IV.6.2 Pondération des critères

A. Critères de l'objectif « VulnSol »

Il est clair que la stabilité du sol est plus importante que l'agressivité chimique et ce parce que les désordres que l'agressivité chimique occasionne aux ouvrages sont moins importants et plus longs à se manifester contrairement à la stabilité de sol qui pourrait occasionner de graves dégâts (tassement, liquéfaction et glissement, etc.) et en un laps de temps réduit. Aussi, les désordres dus à l'agressivité chimique sont facilement entretenus et réhabilités contrairement à ceux issus de la stabilité du sol qui, parfois, sont irrémédiables.

B. Critères de l'objectif « VulnStr »

Dans notre classification des critères de cet objectif, nous avons préféré le critère « SysStr » parce qu'il tient compte de la qualité de conception en zone sismique. Ensuite, le critère « ConcArch » a une importance considérable au comportement de l'ouvrage lors des dégâts puisque la forme de la structure est un paramètre très déterminant à son comportement lors de séisme. En fin, le critère « EtatStr » qui reflète l'état de la structure au cours du temps.

C. Critères de l'objectif « VulnSoc »

Dans notre approche de classification des critères de cet objectif, nous avons favorisé le critère « secourisme » parce qu'il tient compte de la capacité de sauver des vies lors de sinistres. Ensuite, les deux critères « Qualvie » et « Accblt » ont été pondérés avec le même

ordre de préférence parce qu'ils reflètent le cadre occupé qui est plus important que les derniers critères qui reflètent le cadre occupant.

IV.6.3 Pondération des objectifs

Il est évident que la « VulnStr » est l'objectif le plus important de notre méthodologie, du fait de son importance démontrée quant à la stabilité de l'ouvrage au cours du temps. Vient ensuite la « VulnSol » qui aussi d'une importance similaire au premier puisque le sol est moteur de plusieurs aléas externes à la stabilité de la structure au cours du temps.

L'objectif « VulnSoc » est presque de même importance. En effet, même si un bâtiment est bien conçu sur un bon sol mais si la population est vulnérable, la vulnérabilité finale sera affectée.

IV.6.4 Performances obtenues par niveaux intermédiaires

Dans ce chapitre, nous avons choisi dix exemples de bâtiments d'habitation à la wilaya de Bouira de différentes caractéristiques, dans le but d'en tenir compte des différentes exigences de notre méthodologie.

Les résultats obtenus, ont été présentés sous différentes formes (Tableaux, courbes radars, histogrammes et organigrammes) dans le but de garantir leur clarté et compréhension.

Nous avons entamé notre application par le calcul des IPs en se basant, d'une part, sur les méthodes de calcul définies dans le troisième chapitre et, d'autre part, sur les paramètres techniques de la structure (conception architecturale, études d'ingénierie, etc.) ainsi que sur une étude statistique du volet social. Les résultats obtenus ont été regroupés dans des tableaux de contrôle et de diagnostic de la vulnérabilité (Tableaux IV.1 – IV.22).

Dans un deuxième lieu, nous avons attribué à chaque IP une note de performance en se basant d'une part sur les échelles définies dans le chapitre 3 et d'autre sur les valeurs de calcul obtenues précédemment. Les observations suivantes sont à relever :

- Les IPs de l'objectif « VulnSol » ont des valeurs de performance assez proches du fait de la similarité des terrains ;
- Les performances des IPs de l'objectif « VulnStr » sont fonction des projets. En effet, chaque cas d'étude présente des tendances proches en termes de valeurs de performance. Les différences notables en termes de performance entre les cas d'études

sont essentiellement : Les irrégularités en plans, la hauteur des bâtiments, l'existence de joint et les travaux d'entretien et de réhabilitation ;

- Concernant les IPs de l'objectif « VulnSoc » il a été observé des différences assez remarquables quant au calcul des performances. Ceci est dû au fait de la différence au sein de la population résidente. Le taux d'occupation est aussi un paramètre très variant en termes d'affichage de performance. L'éloignement par rapport aux centres de secourisme a aussi affiché des valeurs de performances et ce en fonction des distances mesurées.
- Finalement, et concernant les IPs de l'objectif « VulnEnv » les performances des IPs sont pratiquement les mêmes sauf différence dans l'IP « CCU » qui diffère entre les cas d'études.

Par l'application de la méthode AHP nous nous sommes intéressés aux calculs des poids des indicateurs. Les résultats obtenus nous ont permis de classer les paramètres de vulnérabilité par ordre d'importance. Ensuite, le calcul des performances de tous les paramètres de vulnérabilité des différents niveaux par l'application de la méthode MSP a été entrepris. Les résultats ont été présentés dans les Figures IV.7 – IV.16. Et, dans le but de simplifier la compréhension et la discussion de ces résultats nous regroupons les valeurs de performances obtenues dans les Figures ci-dessous :

Performances par critères Cas d'étude n°01

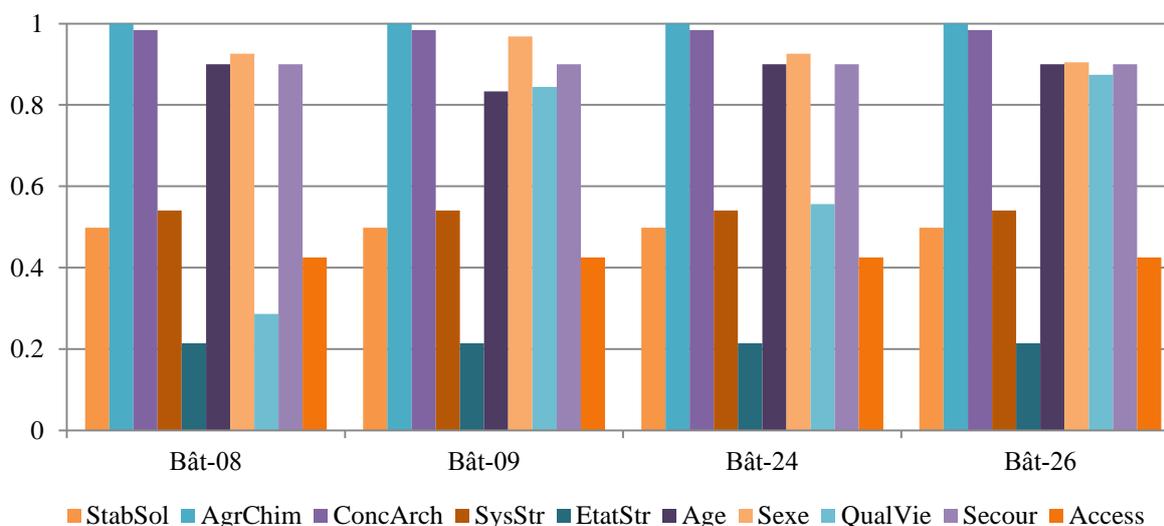


Figure IV.17. Performances obtenues par critères (Cas d'étude n°01)

Performances par critères Cas d'étude n°02

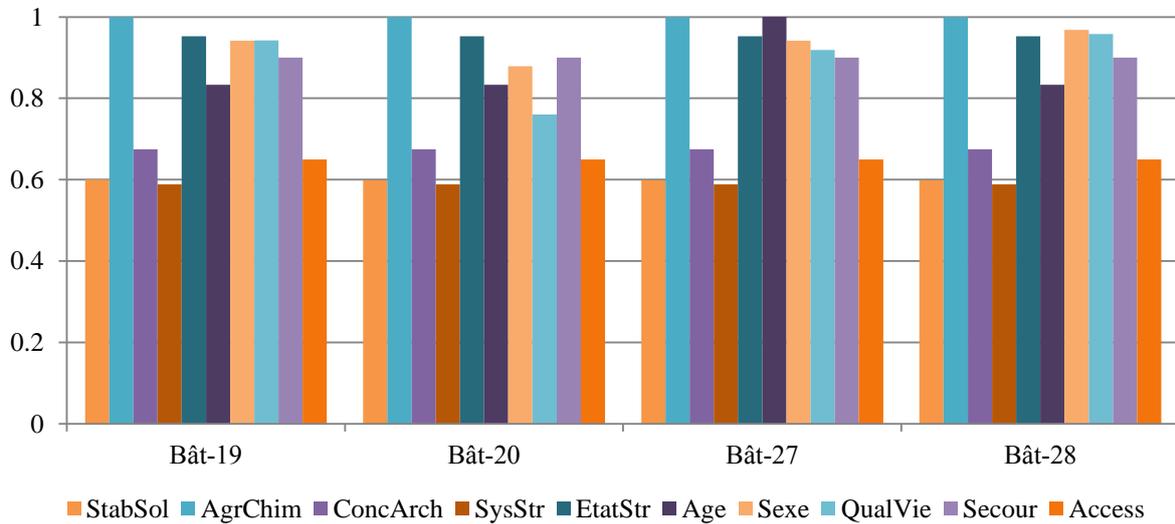


Figure IV.18. Performances obtenues par critères (Cas d'étude n°02)

Performances par critères Cas d'étude n°03

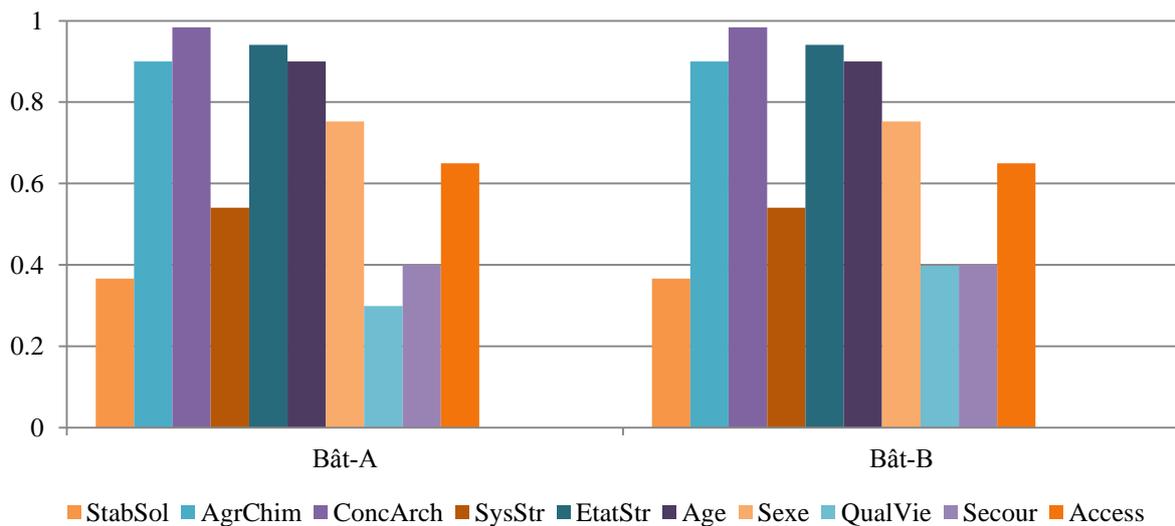


Figure IV.19. Performances obtenues par critères (Cas d'étude n°03)

Performances par objectifs Cas d'étude n°01

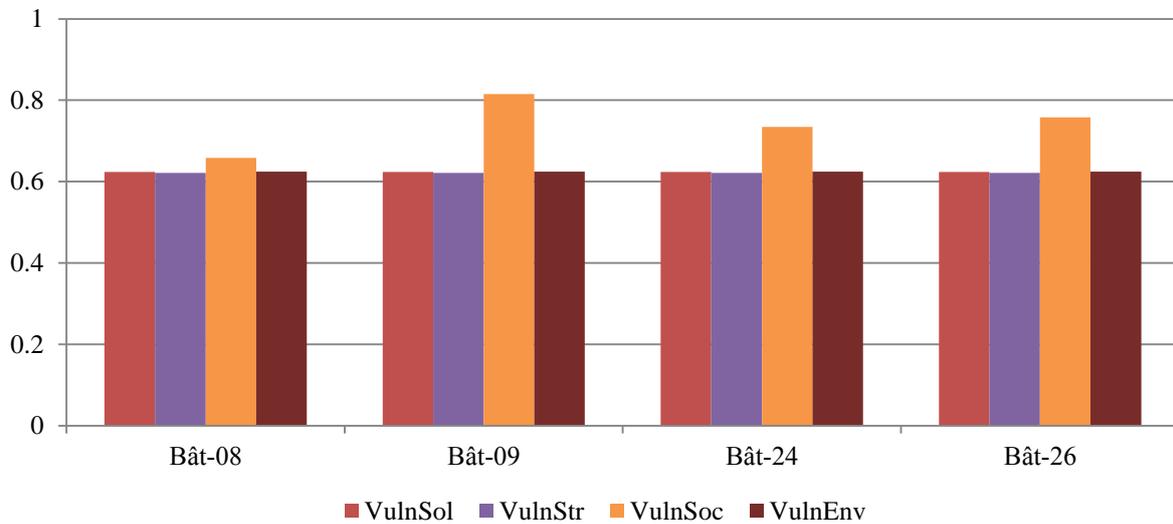


Figure IV.20. Performances obtenues par objectifs (Cas d'étude n°01)

Performances par objectifs Cas d'étude n°02

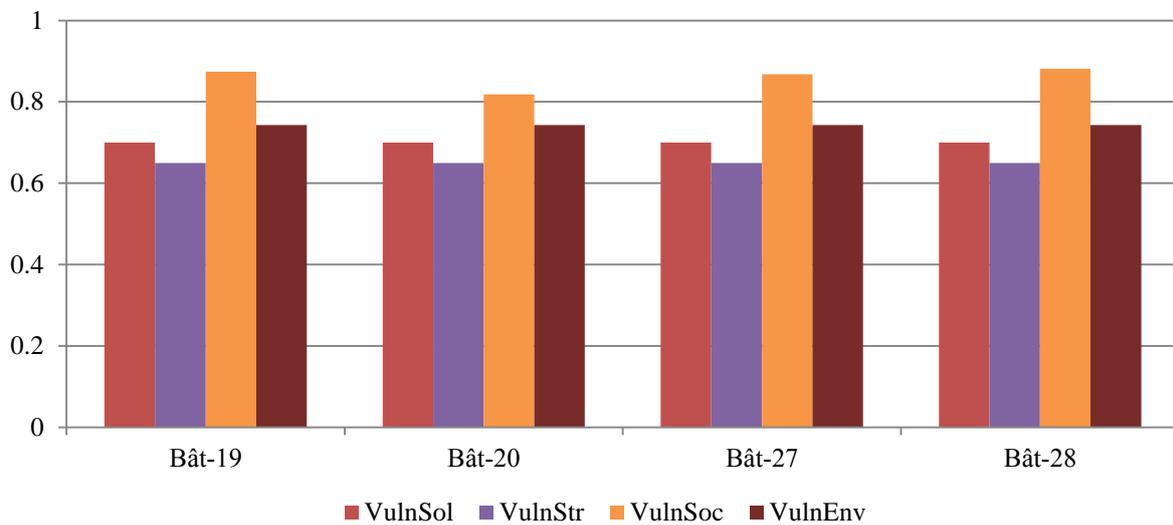


Figure IV.21. Performances obtenues par objectifs (Cas d'étude n°02)

Performances par objectifs Cas d'étude n°03

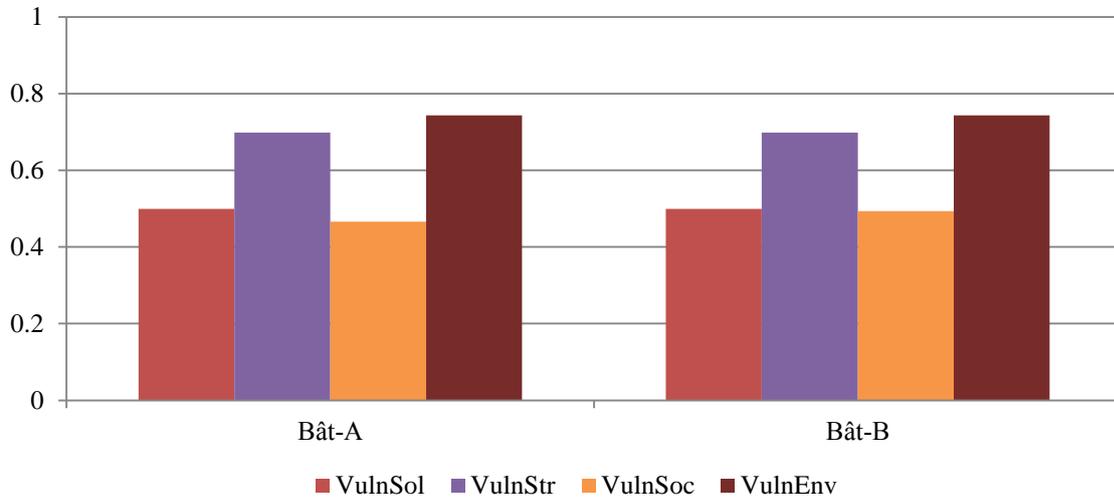


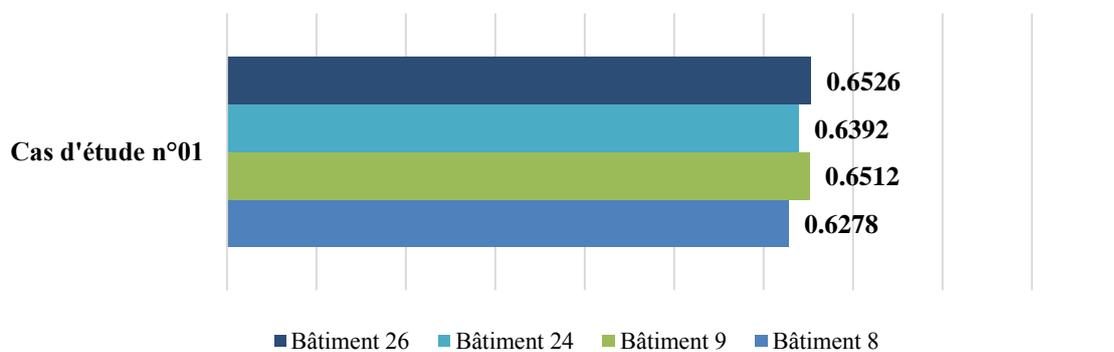
Figure IV.22. Performances obtenues par objectifs (Cas d'étude n°)

D'après les graphes précédents, nous avons remarqué qu'il y a une différence entre les valeurs des performances obtenues par agrégation par la méthode de MSP. Ces différences sont relatives, essentiellement, aux modes de construction, à l'époque de construction et surtout à l'aspect social.

IV.6.5 Indice de vulnérabilité sismiques des cas d'études

Finalement, les indices de vulnérabilité sismique des bâtiments étudiés peuvent être obtenus par simple agrégation des valeurs de performance des objectifs.

Indices de vulnérabilité sismique obtenus des cas de bâtiments étudiés



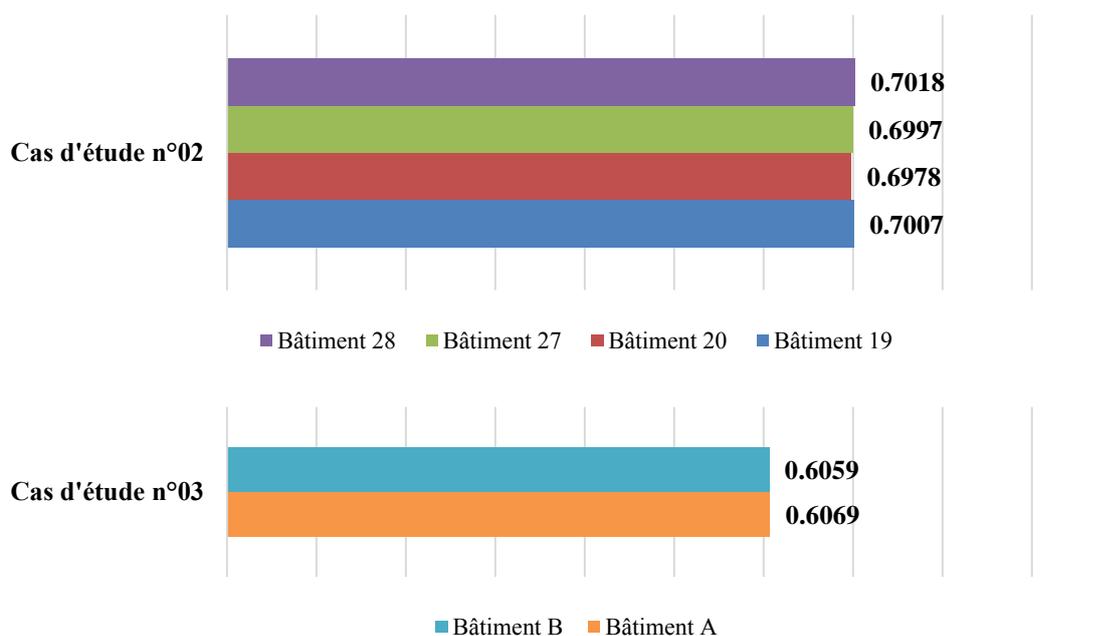


Figure IV.23. Performances sismique des bâtiments des cas étudiés

D'après les résultats obtenus nous avons remarqué que les indices de vulnérabilité des bâtiments étudiés sont proches et sont de moyens à bons. Ceci est dû au fait que les bâtiments sont tous situés dans la même zone géographique et sismique. Néanmoins, des différences ont été soulevées et discutées.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué notre méthodologie que nous avons définie et développée au troisième chapitre, et sur la base des méthodes et échelles décrites, nous avons évalué et calculé la performance des indicateurs, nous avons présenté les résultats sous forme de tableaux.

Ensuite, nous avons classé les indicateurs par ordre d'importance, selon la méthode AHP, puis nous avons calculé les coefficients de pondération. Nous avons évalué les performances de chaque bâtiment par l'utilisation de la méthode MSP. S'appuyant sur le logiciel VISULABASIC, nous avons utilisé la visualisation des résultats à travers son interface afin de simplifier la lecture et la structure hiérarchique.

A la fin, nous avons discuté et argumenté les résultats obtenus.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le séisme est le risque naturel majeur le plus meurtrier et qui cause le plus de dégâts. De 1990 à aujourd'hui, les séismes ont fait plus de 700 000 victimes dans le monde. Si le mécanisme du séisme est aujourd'hui mieux connu, tant du point de vue de son origine, que de sa propagation, il reste encore un phénomène imprévisible.

Evaluer la vulnérabilité constitue un élément essentiel de l'analyse des risques sismiques et gageure lorsque cette analyse porte sur une ville. Depuis plusieurs années, différentes équipes travaillent à l'élaboration de méthodes d'approche de cette vulnérabilité des villes face à l'aléa sismique. Différents niveaux d'analyse sont ainsi disponibles dans la littérature, depuis l'analyse grande échelle (toute une ville) jusqu'à l'analyse d'un bâtiment particulier. Les méthodologies utilisées dans cet article ont été choisies; de façon à tenir compte des spécificités de la zone d'étude et à permettre leur application à d'autres villes de la région ([Benmarce et al., 2012](#)).

Ce travail avait pour objectif principale de définir une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation dans le contexte algérien.

Dans le but de mettre en place une telle méthodologie, nous avons commencé dans le chapitre par une recherche bibliographique qui avait pour but de comprendre et de mesurer le champ de l'étude et les problématiques à surmontées à travers une étude détaillée de la littérature existante. Ensuite, pour comprendre l'applicabilité et les limites de notre méthodologie, une connaissance de l'état des lieux du parc résidentiel algérien était essentielle. C'était l'objet du chapitre 2.

Dans le chapitre 3, nous avons exposé méthodologie qui était basée sur deux approches complémentaires : la méthode descendante « Top-down » et la méthode ascendante « Bottom-up ». A l'issue de la première nous avons structuré le squelette de notre méthodologie. Les différents paramètres d'évaluation de la vulnérabilité ont été recensés, des méthodes de calcul

ont été définis et des échelles de performance ont été construites. Par opposition à cette première approche, une approche complémentaire a été retenue pour permettre de remonter aux niveaux supérieurs et ainsi pouvoir calculer l'indice de vulnérabilité sismique des bâtiments d'habitation. Pour cela, nous avons choisi pour notre processus d'agrégation la méthode de la somme pondérée et pour la pondération des paramètres d'évaluation la méthode AHP.

Enfin, la méthodologie développée ainsi que la base de données collectée ont fait l'objet d'une application sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans la région de Bouira. Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les valeurs de la vulnérabilité obtenue sont de moyenne à bonne. Ceci est en concordance avec l'état des structures étudiées
- La liste des IPs ainsi que les méthodes de calcul et les échelles de performance peuvent 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.

- La pondération des IPs renferme une petite part de subjectivité lors de la construction des matrices de décision qui peut être corrigée par une étude de variantes.
- Une généralisation de la méthodologie à l'échelle du quartier et de la ville serait plus intéressante et les résultats seront plus importants.
- Le parc ancien doit présenter des valeurs de performance largement au-dessous de celle-ci. Ce travail pourrait faire l'objet de recherche future.

Références bibliographiques

Bibliographie

Abbadie et al. (décembre 2021). Les mondes agricoles face au problème des pesticides. Option edition journals , Volume 21 numéro 3.

Adjamagbo A et al. (2020). Introduction: la vulnérabilité à la croisée de thématiques et de disciplines variées. La vulnérabilité à l'encontre des idées reçues, Laboratoire Population Environnement Développement (LPED), pp.6-11, 2020, Les Impromptus du LPED. (hal-02921841).

Agrebi M. (2018). Méthodes d'aide à 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. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis; Université de Sfax.

Amellal O. (2020). Elaboration de courbes de vulnérabilité pour les structures en charpente métallique pour l'Algérie. Université Blida, Algérie.

Andreas C et al. (2009). Multi-attribute analysis of trophic state and waterfowl management in Ringkøbing Fjord, Denmark. Journal of environmental management , Volume 90, Issue 8, June 2009, Pages 2568-2577.

Armas et Ayram. (2009). Conceptual approaches concerning risk, vulnerability and adaptation. Risks and catastrophes journal 15(2):7 .

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> .

Aruldoss M ,Lakshmi A,Venkatesan P. (2013). A Survey on multi criteria decision making methods and its applications. American journal of information systems 1 , no. 1 (2013): 31-43. doi: 10.12691/ajis-1-1-5.

Banque mondiale. (s.d.). Consulté le Avril 14, 2022, sur <https://www.banquemondiale.org/fr/home>.

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/> , 164.

Ben Mena S. (janvier 2000). Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. Volume 4 (2000), Numéro 2, 83-93 URL : <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=15338>.

Benmarce et al. (2012). Risque et vulnérabilité sismique à l'échelle d'une ville exemple de la ville de Constantine. Volume 0.N-36.15-24.

- Betbder M-J , Doury J. (10 mai 1997). Constructions parasismiques. Droit et organisation générale de la construction .
- Bouchène A-B, Peyroulou J-P, Siari Tengour O, Thénault S. (2014). Histoire de l'Algérie à la période coloniale. portail partenaire.
- Boukais S et al . (2009). Vulnérabilité et performance sismique des construction en portiques auto-stables avant et après confortement. Annales du bâtiment et des travaux publics .
- Boukais S. (2018). Evaluation des structures endommagées par le séisme, leur confortement et réparation. Tizi-Ouzou, Algérie.
- Cahier Technique. (Février 2004). Le Séisme de Boumerdès Algérie. PARIS.
- Calvi G-M et al. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. Journal of Earthquake Technology , Paper No. 472, Vol. 43, No. 3, September 2006, pp. 75-104 .
- Cartier S, El Assad H. (2010). Enjeux et procédures de protection sismique du patrimoine historique. Les annales de la recherche urbaine n°106, 2010, pp. 166-175.
- Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique. CRAAG. (s.d.). Consulté le Avril et juin 2022
- CEREF-Ensemble pour la transition énergétique en Algérie. (s.d.). Consulté le Avril 2022
- CGS. (s.d.). 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, Al.
- Cherrared M, Zekiouk T et Chocat B. (2011). Application de la méthode AHP pour l'évaluation de la performance des systèmes d'assainissement urbains. Journal of Decision Systems , Volume 20, 2011 - Issue 1.
- Chirifi, F. (2016, decembre 11). Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants en Algerie. Tizi-ouzou, Génie civil, Algérie.
- Clotaire M. (2007). Vulnérabilité Sismique de l'échelle du bâtiment à celle de la ville - Apport des techniques expérimentales in situ - Application à Grenoble. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007. Français.
- Colombi M et al. (2008). Deriving vulnerability curves using Italian earthquake damage data. Bulletin of earthquake engineering , 485-504.
- Demoraes F. (2009). De l'intérêt d'une étude sur la vulnérabilité des réseaux routiers et de transport pour la compréhension des vulnérabilités territoriales – Le cas du District Métropolitain de Quito (Équateur). Revue européenne de géographie / European journal of geography, UMR 8504 Géographie-cités, 2009, 18p. 10.4000/cybergeog.22101. halshs-00436899.
- Dif H. (2020). Contribution à l'évaluation du risque sismique en milieu urbain par la prise en compte des effets de site. Tlemcen ,Algérie.

- Dolce M et al. (2005). Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies. *Journal engineering structures* .
- El Khoudi M et al. (2020). Synthèse comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité. *Journal of water sciences & environment technologies* , Jowset, 2020 (05), N°1,530-534.
- Farsi M-N. (2012). Identification des structures de génie civil à partir de leurs réponses vibratoires: vulnérabilité du bâti existant. *Géologie appliquée. Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 1996. Français.*
- Guéguen P. (2007). Gestion du patrimoine bâti et risque sismique : automatisation de calcul de l'indice de vulnérabilité des bâtiments. Programme de recherche 2007 financé par le Conseil Général de l'Isère .
- Hadjilah A. (2016). L'architecture des premières maisons européennes d'Alger, 1830-1865. *Artl@s Bulletin* 5, no. 1 (2016): Article 2.
- Jato-Espino D et al. (2014). A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in construction* .
- Larousse. (s.d.). *Dictionnaires français* . Consulté le juin 24, 2022, sur <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>.
- Laurent Henriet. Systèmes d'évaluation et de classification multicritères pour l'aide à la décision : Construction de modèles et procédures d'affectation. *Informatique [cs]. Université Paris Dauphine -Paris IX, 2000. Français. tel-00528799.*
- Leone F et al. (2007). Développement d'une méthodologie d'analyse spatiale des destructions consécutives au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda aceh, Indonésie. *Open edition journals* , Volume 82/1-2 2007.
- Leone F, et Vinet F. (2005). La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. *Analyses géographiques* , Collection de l'équipe d'accueil GESTER Université Paul-Valéry — Montpellier III.
- Lindsay et al. (2006). Unpacking " participation" in the adaptiv management of social ecological systems. *Ecology and Society* , 22.
- Long K. (2002). Seismic vulnerability of existing buildings. *Institute of structural engineering swiss federal institute of technology* .
- Madani Safar-Zitoun. (2012). État Providence et politique du logement en Algérie. *Revue Tiers Monde* , (n°210), pages 89 à 106.
- Mammar L et al. (2016). Indices de vulnérabilité des constructions existantes à Oran (Indices of vulnerability of existing buildings in Oran). 942-955.
- Marris G-C et Edwards J-P. (1995). The biology of the ectoparasitoid wasp *eulophus pennicornis* (Hymenoptera: Eulophidae) on host larvae of the tomato moth, *Lacanobia oleracea* (Lepidoptera: Noctuidae). *Bulletin of entomological research* , Volume 85 Issue 4.

- Martin C. (2019). Penser la vulnérabilité. Les apports de Robert Castel. Les cahiers de la justice , Issu 1958-3702 /667 à 677. <https://www.cairn.info/revue-les-cahiers-de-la-justice-2019-4-page-667.htm>.
- Mazurek H. (s.d.). Le concept de vulnérabilité : changer de point de vue. La vulnérabilité aux risques environnementaux et climatiques . Géographe, IRD, LPED, UMR 151,.
- MHAT. (2004). Rapport risque sismique et redéploiement des activités et de l'urbanisation.
- Michael G et Poveda C. (2011). A Review of Sustainability Assessment and Sustainability/Environmental Rating Systems and Credit Weighting Tools. Journal of Sustainable Development , Vol. 4, No. 6.
- ministère de l'habitat de l'urbanisme et de la ville. (2015). Consulté le Avril 20, 2022
- Moussaoui F, Cherrared M. (2021). Application of the AHP method for the development of a seismic performance index for residential buildings in Algeria. Algérie équipement , 77-89.
- Moussaoui F et al. (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 , Volume 42, Pages 622-636.
- Moussaoui F, Cherrared M. (2014). Contribution à l'évaluation de la durabilité des bâtiments d'habitation en Algérie – Étude des dégradations structurelles. Les Premières Rencontres Nationales de Génie Civil – Bejaia, Algérie.
- Moussaoui F, Cherrared M. (2015). Contribution to assessment of the seismic performance of residential buildings in the Algerian context. International Conference Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures, Rio de Janeiro, Brazil .
- Nassar K, Thabet W et Beliveau Y. (2003). A procedure for multi-criteria selection of building assemblies. Automation in Construction , Volume 12, Issue 5, September 2003, Pages 543-560.
- Office National des Statistiques: ONS. (s.d.). Consulté le Avril 15, 2022, sur <https://www.ons.dz/spip.php?rubrique3>.
- Ourabah A et al. (2010). Analyse pushover d'une structure auto stable (R+8) pushover analysis of multistory structures. Symposium international sur la Construction en Zone Sismique , Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie.
- Perrault M. (2013). Evaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments à partir de mesures in situ. Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 2013. Français. NNT : 2013GRENU009.
- Perspective Monde. (s.d.). Consulté le Avril 17, 2022, sur Site internet.
- Picard P. (1994). Architecture et urbanisme en Algérie. D'une rive à l'autre (1830-1962). Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée , 73-74/ 121-136.
- Pohekar S et Ramachandran M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews , Volume 8, Issue 4, Pages 365-381.

- Rashed T et Weeks J. (2003). Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas. *Journal Geographical information science* .
- Rohrman B. (1995). A socio-psychological model for analyzing. *Disaster and Trauma Studies* , Volume : 2000-2.
- Roy B, Bouyssou D. (1993). Aide Multicritère à la Décision :Méthodes et Cas. Production et Techniques quantitatives appliquées à la gestion , dirigée par Vincent Gia rd, Professeur des Universités (/AE de Paris Université de Paris 1 J.
- RPA. (1999). Regles Parasismique Algériennes 99- Virsion 2003. Ministre de l'habitat. Document technique réglementaire DTR BC 2 48. Centre national de recherche appliquée en génie parasismique. , 120.
- Saaty T. (June 1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* , Volume 15, Issue 3, Pages 234-281.
- Slovie P. (1992). Perceptions of Risk: Reflections on the Psychometric Paradigm.
- Velardo F, Frau A. (2015). Vulnérabilitésismiquedesstructuresenmaçonnerie: Analyse etexemplesd'interventionsurdescasréels. 9ème Colloque Nationale AFPS 2015, Nov2015, Marne-La-Vallée.
- Waas et al. (2014). Sustainability Assessment and Indicators: Tools in a Decision-Making Strategy for Sustainable Development. *Economic and Business Aspects of Sustainability* , Sustainability, 6(9), 5512-5534.
- Yannou B, Limayem F. (2004). Generalization of the RCGM and LSLRpairwise comparison methods. *Computers & Mathematics with Applications* , Volume 48, Issues 3–4, August 2004, Pages 539-548.