

N° Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE D'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 :

**ALIOUANE Abdalhak
DACI Abderaouf**

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

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème :

**Contribution à l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments
d'habitation en Algérie Application à la ville de Bouira**

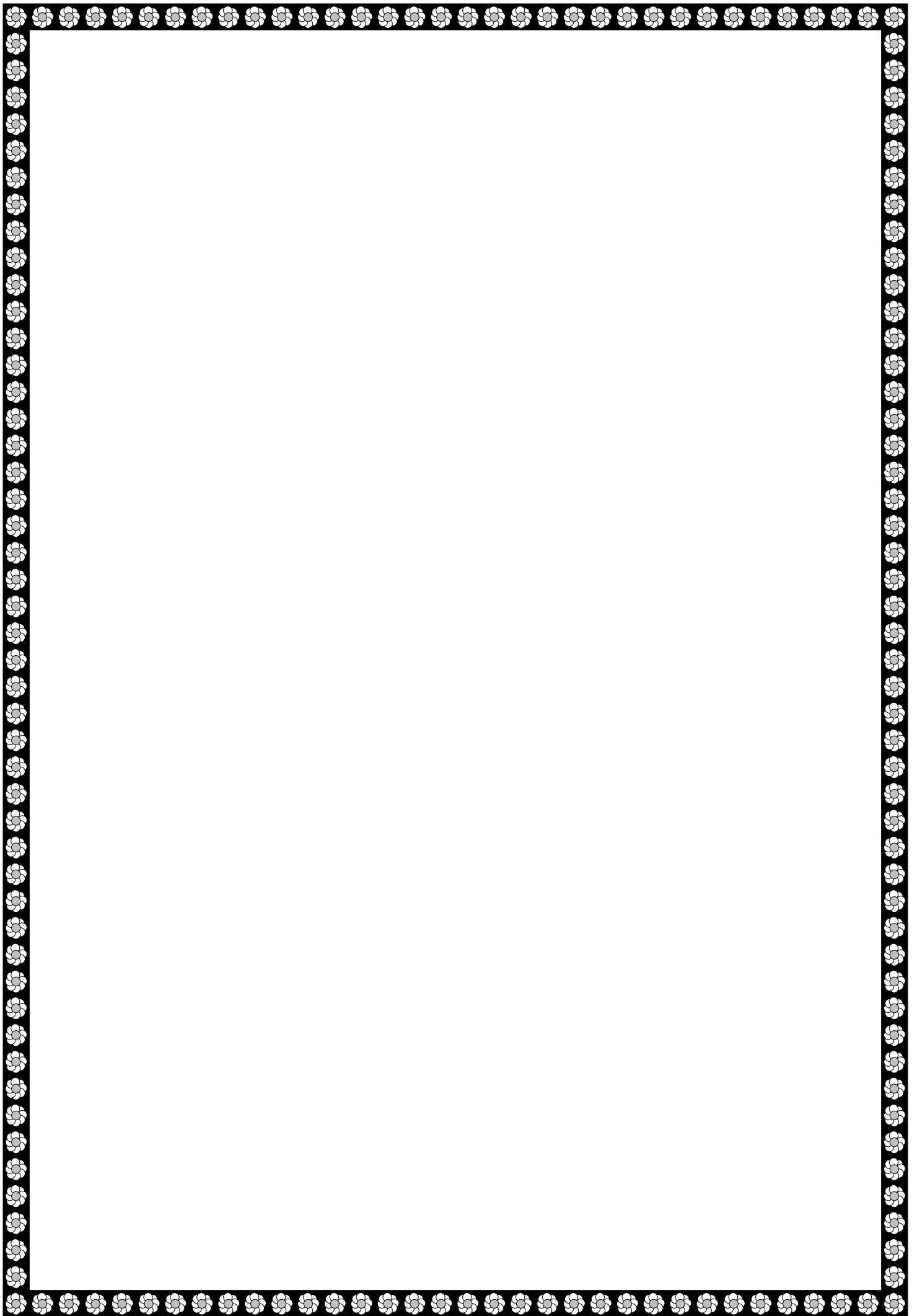
Devant le jury composé de :

Mr. Arbaoui ahcene
Mr. Moussaoui fahem
Mr. Aouari issam

UAMOB / MCA
UAMOB / MCB
UAMOB / MAA

Président
Encadrant
Examineur

Année Universitaire 2021/2022



Remerciements

Nous tenons à remercier en premier << Allah >> le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage et l'aptitude pour mener à terme ce travail.

Nous exprimons notre plus profonde gratitude à Mr. MOUSSAOUI qui nous encadrés et orientée, nous le remercions pour tous ses conseils, et ses précieuses directives, sa grande disponibilité, ses fructueux conseils et critiques, ses suggestions pertinentes, son suivi constant, son soutien tout le long de la réalisation de ce modeste travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ABDELHAK & ABDEAOUF

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents qui m'ont encouragé à aller de l'avant, et qui ont toujours été à mes côtés et qui m'ont soutenu pendant les moments difficiles, et qui ont sacrifié leur vie afin de me voir devenir ce que je suis, et je prie Dieu le tout puissant de les protéger et de leur Accorder une longue vie.

À mes sœurs : FATIMA, ROKAYA, KHADIDJA, NADJIA, SAMIA, NABILA, ABLA.

À mes frères : Ahmed, Mohamed.

À toute ma famille mes grands parents, mes oncles, mes tantes.

À mes camarades de promotion tous les étudiants de Génie civil 2021/2022.

À tous ceux et celles que j'aime de près comme de loin. Et à tous ceux qui m'ont soutenu qui ont participé et soutenu la réalisation de ce travail.

ABDELHAK

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus Pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci à mes parents.

A mes frères: azeddine ; fouade ; abderahim

A Ma sœur : nesrine

À toute ma famille mes grands-parents, mes oncles, mes tantes,

A Toutes les personnes qui me connaissent. À tous les étudiants de Génie civil. Et à tous ceux qui m'ont soutenu.

ABDERAOUF

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Table des matières	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xi
Nomenclature et Abréviation	xiii
Résumé	xv
Abstract	xvi
ملخص.....	xvii

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 01 : Efficacité énergétique des bâtiments d’habitation – Bibliographie

I.1	
Introduction	4
I.2 Définitions et terminologies	4
I.2.1 Efficacité énergétique et performance énergétique – Quelle différence ?	4
I.2.2	
Et l’efficience énergétique ?	5
I.3 Situation énergétique mondiale – Statistiques	5
I.3.1 Énergies fossiles – Données et statistiques	5
A. Le nucléaire et la production de l’électricité	10
I.3.2 Energies renouvelables – Données et statistiques	12
I.3.3 Qui consomme le plus d’énergie ?	14
I.4 Situation énergétique mondiale – Perspectives	14
I.4.1 Perspectives des besoins énergétiques mondiaux	14
I.4.2 Sources d’énergies davantage consommées à l’horizon 2050	15

I.4.3 Consommation d'énergie par secteur	16
.5 Efficacité énergétique à l'échelle mondiale – Politique, enjeux, développements et Tendances	17
.....	18
I.5.1 Enjeux et politiques	18
I.5.2 Politiques et tendances d'efficacité énergétique par région	19
I.5.3 Politiques et tendances d'efficacité énergétique par secteur	21
I.5.4 Evaluation des politiques et tendances d'efficacité énergétique	23
I.5.5 Recommandations pour une réelle politique d'efficacité énergétique	26
.6 Efficacité énergétique dans le secteur résidentiel	27
I.6.1 Besoins énergétiques dans le bâtiment	28
I.6.2 Pourquoi s'intéresser à l'efficacité énergétique des bâtiments ?	29
I.6.3 Pourquoi améliorer l'efficacité énergétique ?	30
I.6.4 Comment améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment	30
I.6.5 Rôle des énergies renouvelables dans la maîtrise de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel	31
I.6.6 Emissions de CO ₂ liés à la consommation d'énergie dans secteur des bâtiments	
	33
.7 Méthodes multicritères d'aide à la décision – un outil fiable pour l'évaluation de L'efficacité énergétique des bâtiments	34
I.7.1 Contexte général	34
I.7.2 Définition	35
I.7.3 Terminologies	35
I.7.4 Méthodes multicritères d'aide à la décision (MMAD)	36
I.7.5 Méthodes d'aide à la décision les plus utilisés dans la littérature	37
I.7.6 Domaines d'applications des MMAD	39
I.7.7 Application des MMAD dans le domaine de l'évaluation de l'efficacité énergétique des bâtiments d'habitation	41
.8 Conclusion	42
Chapitre 02 : Maitrise de l'énergie et efficacité énergétique du secteur résidentiel en Algérie - Etat des lieux	
II.1 Introduction	43
II.2 Parc énergétique de Algérie – État des lieux	43
II.2.1 Réserves des énergies primaires (fossiles)	43
II.2.2 Réserves des énergies renouvelables	44
II.2.3 Production des énergies en Algérie	48
II.2.4 Gouvernance du parc énergétique en Algérie	51
II.3 Situation énergétique dans le secteur résidentiel en Algérie	53
II.3.1 Parc du logement en Algérie	53
II.3.2 Parc du logement à l'horizon 2050.....	54
II.3.3 Consommation énergétique des bâtiments d'habitation	55
II.1.1 Impact environnemental (émission des GES)	57
II.1.2 Gouvernance énergétique dans le secteur	59
.....	59
II.4 Efficacité énergétique dans le secteur résidentiel – Etat des lieux et perspectives ...	60
II.4.1 Prise de conscience et émergence du concept	60
II.4.2 Plan d'action du gouvernement dans le secteur	60
II.1.3 Acteurs de l'efficacité énergétique dans le secteur	67
II.5 Conclusion	68

Table des matières

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

III.1 Introduction	70
III.2 Méthodologie proposée	70
III.2.1 Portée de l'étude	70
III.2.2 Structure de la méthodologie	70
III.2.3 Approche diagnostique descendante "Top-Down"	73
III.2.4 Approche ascendante – "Bottom-up" : Agrégation multicritères	94
A. Présentation générale de la méthode	95
B. Etapes de la procédure AHP	96
Hiérarchisation des indicateurs par importance	96
Comparaison des indicateurs par importance	96
Détermination des poids associés à chaque indicateur	97
Vérification de la consistance de résultat	98
III.3 Conclusion	99

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

IV.1 Introduction	100
IV.2 Présentation des cas d'études	100
IV.2.1 Cas d'étude n°01 : Maison individuelle	100
.....	101
IV.2.2 Cas d'étude n°02 : Bâtiment collectif	103
IV.3 Application de la méthodologie	106
IV.3.1 Cas d'étude n°01	106
IV.3.2 Synthèse de calcul des IPs du premier cas d'étude	112
IV.3.3 Synthèse de calcul des IPs du deuxième cas d'étude	115
IV.4 Pondération des IPs – Méthode AHP	117
IV.4.1 Exemple d'application : Pondération des IPs du critère « Isolation »	117
IV.4.2 Synthèse de calcul des pondérations	119
IV.5 Calcul des performances – Méthode MSP	121
IV.5.1 Programmation d'un outil d'évaluation des performances	122
IV.6 Discussion des résultats	127
IV.7 Conclusion	129

Conclusion générale	130
---------------------------	-----

Bibliographie	132
---------------------	-----

Liste des figures

Chapitre 01

Figure I.1. Consommation et production du pétrole par régions (BP, 2021a).....	6
Figure I.2. Ratios R/P du pétrole pour chaque région et classement des 10 principaux pays (unité : milliards de barils) (BP, 2021a ; AIE, 2021)	7
Figure I.3. Consommation et production du Gaz naturel pour chaque région (BP, 2021a)	7
Figure I.4. Ratios R/P du gaz naturel pour chaque région et classement des 10 principaux pays (unité : Terra m ³) (BP, 2021a ; AIE, 2021).....	8
Figure I.5. Consommation et la production de charbon pour chaque région (BP, 2021a)	9
Figure I.6. Ratios R/P du charbon pour chaque région et classement des 10 principaux pays (unité : milliard de tonnes) (BP, 2021a ; AIE, 2021)	9
Figure I.7. Production de l'électricité dans le monde (IEA, 2018)	10
Figure I.8. Consommation de l'énergie nucléaire par région et classement des 10 principaux pays (unité : milliers de tonnes) (BP, 2021a ; AIE, 2021).....	10
Figure I.9. Consommation mondiale d'énergie primaire par zone géographique (unité : Gtep) (Commissariat général au développement durable, 2021).....	11
Figure I.10. Consommation mondiale d'énergie primaire par type d'énergie (unité : Gtep) (Commissariat général au développement durable, 2021).....	11
Figure I.11. Consommation mondiale d'énergie primaire par type d'énergie (unité : Gtep) (Commissariat général au développement durable, 2021).....	12
Figure I.12. Production d'énergies renouvelables par source (BP, 2021a).....	13
Figure I.13. Consommation d'énergies renouvelables par région (BP, 2021a).....	13
Figure I.14. Évaluation de la consommation d'énergie primaire par source (IEA, 2019).....	15
Figure I.15. Consommation d'énergie primaire par secteur d'utilisation finale	16
Figure I.16. Croissance annuelle de la demande et contributions des secteurs.....	17
Figure I.17. Pays concernés par l'enquête du CME (Chicago Mercantile Exchange) sur les politiques d'efficacité énergétique.....	18
Figure I.18. Intensité énergétique primaire à parités de pouvoir d'achat.....	20
Figure I.19. Intensité énergétique primaire à parités de pouvoir d'achat.....	21
Figure I.20. Décomposition de l'intensité énergétique primaire par secteurs industriels	21
Figure I. 21. Les économies d'énergie au niveau mondial.....	23
Figure I.22. Part des renouvelables dans la production d'électricité (1990 vs 2011)	24
Figure I.23. Répartition des émissions mondiales de CO ₂ dues à la consommation d'énergie .	25
Figure I.24. Émissions de CO ₂ par habitant dues à la combustion d'énergie.....	26

Le besoin d'énergie se traduit par la demande d'énergie finale, par exemple les besoins de chaleur pour le chauffage d'une maison donnent naissance à une demande d'électricité, du fuel-oil ou de gaz cette demande est schématisée dans la Figure I.25.	29
Figure I.26. Besoins d'énergies dans le cas du chauffage domestique	29
Figure I.27. Exemple d'utilisation de l'énergie solaire Photovoltaïque dans le bâtiment	32
Figure I.28. Solaire thermique	32
Figure I.29. Production d'électricité dans le bâtiment par énergie du vent	33
Figure I.30. Schéma d'une installation-type de géothermie	33
Figure I.31. Part mondiale des bâtiments et de la construction dans la consommation finale d'énergie et les émissions (Source : Rapport sur la situation mondiale des bâtiments et de la construction, 2020)	34
Figure I.32. Schéma illustratif de l'aide à la décision	34
Figure I.33. Méthodes multicritères d'aide à la décision	36

Chapitre 02

Figure II.1. Carte des bassins sédimentaires de l'Algérie (MEM, 2021)	44
Figure II.2. Carte de l'Irradiation directe annuelle moyenne (MEM, 2021).	45
Figure II.3. Carte du vent annuel moyen à 50m (Période 2001-2010) (MEM, 2021).....	46
Figure II.4. Cartographie et caractérisation des ressources géothermique de l'Algérie (GmbH, 2022)	47
Figure II.5. Carte pluviométrique pour le nord de l'Algérie (GmbH, 2022)	47
Figure II.6. Localisation des barrages Algériens (GmbH, 2022)	48
Figure II.7. Structure de la production d'énergie primaire	49
Figure II.8. Structure de la production des énergies dérivées	50
Figure II.9. Structure de La production d'électricité d'origine renouvelable	51
Figure II.10. Organigramme de la gouvernance du parc énergétique en Algérie	52
Figure II.11. Nombre des logements réalisés en Algérie (1999-2018) (Lkeria, 2019).....	53
Figure II.12. Structure des logements en fonction de leur type en Algérie (1999-2018) (Algérie presse service, 2018).....	53
Figure II.13. Évolution de la population totale Algérie (1960-2020) (Perspective monde, 2020)	54
Figure II.14. Estimation de la surface du parc de logement à l'horizon en 2050 (Ouahab, 2015)	54
Figure II.15. Logement par typologie selon les zones climatiques en 2050 (Ouahab, 2015)...	55
Figure II.16. Consommation finale d'énergies par secteur d'activité (APRUE, 2019).....	55
Figure II.17. Évolution de la consommation finale d'énergie de l'Algérie dans le secteur résidentiel (2000- 2019) (Unité : Millions de tonnes d'équivalent de pétrole) (DGRIS, 2021)	55
Figure II.18. Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type de logement et d'énergies (APRUE, 2019)	56
Figure II.19. Répartition de la consommation d'énergies par zone climatique (Ouahab, 2015)	56

Figure II.20. Consommation du secteur résidentiel en 2008 par type de logement et selon les zones climatiques (Ouahab, 2015)	57
Figure II.21. Zones climatiques selon la réglementation thermique algérienne (Ouahab, 2015)	57
Figure II.22. Émission des GES par secteur en millions de teq CO ₂ (APRUE, 2019).....	58
Figure II.23. Emissions de CO ₂ par type de logement à l'horizon 2050 (Ouahab, 2015).....	58
Figure II.24. Emissions de CO ₂ par type d'énergies utilisé dans logement à l'horizon 2050 (Ouahab, 2015).....	58
Figure II.25. Gouvernance énergétique dans le secteur résidentiel en Algérie.....	59
Figure II.26. Les phases de réalisation de programme national de l'efficacité énergétique.....	61
Figure II.27. Potentiel d'économie des énergies jusqu'à à l'horizon 2030.....	61
Figure II.28. La répartition des énergies renouvelables sur la période 2015-2030 (MEM, 2021)	64
Figure II.29. Programme de construction de bâtiments efficaces en Algérie	64
Figure II.30. Acteurs de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel en Algérie	68

Chapitre 03

Figure III.1..Méthodologie adoptée pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation	71
Figure III.2. Schéma illustrant les principes de modélisation "Top-Down" (Thorel, 2006).....	73
Figure III.3. Méthode d'identification des indicateurs.....	74
Figure III.4. Ventilation par refroidissement naturel et mécanique (Camara, 2018)	78
Figure III.5. Techniques d'humidification (Camara, 2018).....	79
Figure III.6. Techniques de protection solaire (Camara, 2018)	79
Figure III.7. Techniques de chauffage solaire passif (l'auvent en tant que solution de chauffage solaire passif) (Camara, 2018)	79
Figure III.8. Échelle de performance de l'indicateur (C _p)	81
Figure III.9. Échelle de performance de l'indicateur (C _{int}).....	82
Figure III.10. Échelle de performance de l'indicateur (C _{ext}).....	82
Figure III.11. Echelle de performance de l'indicateur (S _w)	83
Figure III.12. Echelle de performance de l'indicateur (U _w)	84
Figure III. 13. Echelle de performance de l'indicateur (FF)	84
Figure III.14. Distance ente les bâtiments (Mehaoued, 2019)	85
Figure III.15. Échelle de performance de l'indicateur (d _w)	85
Figure III.16. Échelle de performance de l'indicateur (λ)	87
Figure III.17. Échelle de performance de l'indicateur (ELE)	89
Figure III.18 . Échelle de performance de l'indicateur (H)	90
Figure III.19. Échelle de performance de l'indicateur (CEE).....	92
Figure III.20. Échelle de performance de l'indicateur (ECO ₂)	93
Figure III. 21. Schéma illustrant les principes de modélisation Buttom-up (Thorel, 2006)	94

Chapitre 04

Figure IV.1. Façade principale du bâtiment 01	101
Figure IV.2. Plan du Rez-de-chaussée du bâtiment 01.....	101
Figure IV.3. Coupe A-A du bâtiment 01	102
Figure IV.4. Photos prises sur le site du premier cas d'étude	102
Figure IV.5. Localisation du cas d'étude n°01 (Source : Google Earth).....	103
Figure IV.6. Façade principale du bâtiment 02.....	104
Figure IV.7. Plan du Rez-de-chaussée du bâtiment 02.....	104
Figure IV.8. Plan étage courant du bâtiment 02.....	105
Figure IV.9. Photos prises sur le site du premier cas d'étude	105
Figure IV.10. Localisation du cas d'étude n°02 (Source : Google Earth)	106
Figure IV.11. Agrégation des performances de l'objectif « Aspect architectural ».....	121
Figure IV.12. Interface du logiciel Visual Basic.....	122
Figure IV.13. Programme de l'outil informatique sur Visuel Basic	124
Figure IV.14. Processus d'agrégation des performances du cas d'étude n°01 sur Visual Basic	125
Figure IV.15. Processus d'agrégation des performances du cas d'étude n°02 sur Visual Basic	126
Figure IV.16. Performances obtenues par critères	128
Figure IV.17. Performances obtenues par objectifs	128
Figure IV.18. Performance énergétique des bâtiments étudiés	129
Figure IV.19. Démarche d'amélioration de l'efficacité énergétique.....	132

Liste des tableaux

Chapitre 01

Tableau I.1. Domaines d'applications, avantages et inconvénients de MMAD	40
--------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre 02

Tableau II.1. Indicateurs des réserves de pétrole et de gaz de l'Algérie en 2019 (DGRIS, 2021)	44
Tableau II.2. Production commerciale d'énergie primaire	48
Tableau II.3. Production des énergies dérivées	49
Tableau II.4. Centrales de la production des énergies renouvelables (MEM, 2021)	51
Tableau II.5. Programme des ER 2030 (en MWp).....	63

Chapitre 03

Tableau III.1. Liste finale des IPs pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation	74
Tableau III.2. Liste finale des IPs pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation (Suite).....	75
Tableau III.3. Tableau de bord des IPs de l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation	76
Tableau III.4. Tableau des méthodes de calcul des IPs	77
Tableau III.5. Tableau des méthodes de calcul des IPs (Suite).....	78
Tableau III.6. Échelle de performance de l'indicateur (OR)	80
Tableau III.7. Échelle de performance de l'indicateur (FOR) (Kim, 2005).....	81
Tableau III.8. Échelle de performance de l'indicateur ($N_{\text{étag}}$).....	81
Tableau III.9. Échelle de performance de l'indicateur (V_{nat}).....	85
Tableau III.10. Échelle de performance de l'indicateur (ZC)	86
Tableau III.11. Échelle de performance de l'indicateur (A_{Iti})	86
Tableau III.12. Échelle de performance de l'indicateur (D)	87
Tableau III.13. Échelle de performance de l'indicateur (E).....	88
Tableau III.14. Échelle de performance de l'indicateur (D_T).....	88
Tableau III.15. Échelle de performance de l'indicateur (UT_{iso}).....	88
Tableau III.16. Échelle de performance de l'indicateur (N_{iso})	88
Tableau III.17. Échelle de performance de l'indicateur (Int _{ER}).....	89

Tableau III.18. Échelle de performance de l'indicateur ($R_{R/F}$)	90
Tableau III.19. Échelle de performance de l'indicateur (T)	90
Tableau III.20. Nombre de luxe	91
Tableau III.21. Facteurs de réflexion.....	91
Tableau III.22. Échelle de performance de l'indicateur (ϕ)	92
Tableau III.23. Échelle de performance de l'indicateur (S_{YS}).....	93
Tableau III.24. Échelle de performance de l'indicateur(UT_{ntech}).	93
Tableau III.25. Échelle de performance de l'indicateur (UT_{mri})	94
Tableau III.26. Degré d'importance des indicateurs	97
Tableau III.27 . Valeurs de RI.....	99
- RI est tiré du Tableau III. 28 (Chapitre III) suivant la taille de la matrice de décision.	
Notrematrice de décision est de (3x3) alors, $RI = 0.58$	118

Chapitre 04

Tableau IV.1. Présentation du cas d'étude n°01 (Maison individuelle)	100
Tableau IV.2. Présentation du cas d'étude n°02 (Bâtiment collectif)	103
Tableau IV.3. Calcul des des IPs du cas d'étude n°01	106
Tableau IV.4. Calcul des des IPs as d'étude n°01 (Suite)	107
Tableau IV.5. Calcul des des IPs du cas d'étude n°01 (Suite).....	108
Tableau IV.6. Calcul des des IPs du cas d'étude n°01 (Suite).....	109
Tableau IV.7. Calcul des IPs « conductivité, effusivité et diffusivité »	109
Tableau IV.8. Résistance thermique des matériaux constituant les parois	110
Tableau IV.9. Coefficients de d'échanges superficiels pour les murs.....	110
Tableau IV.10. Résistance thermique des matériaux constituant la toiture.....	111
Tableau IV.11. Coefficients de d'échanges superficiels pour la toiture.....	111
Tableau IV 12. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°01	112
Tableau IV 13. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°01 (Suite)	113
Tableau IV 14. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°01 (Suite)	114
Tableau IV 15. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°02	115
Tableau IV 16. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°02 (Suite)	116
Tableau IV 17. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°02 (Suite)	117
Tableau IV.18. Attribution des ordres de préférences entre les IPs.....	117
Tableau IV.19. Synthèse de pondération des indicateurs de la performance	119
Tableau IV.20. Synthèse de pondération des critères.....	120
Tableau IV.21. Synthèse de pondération des objectifs.....	120

Nomenclature et Abréviation

ADEME: L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

MEPS: Minimum Energy Performance Standard.

IBEX7: l'International Building Energy Exchange.

EU: les États-Unis.

OPEP : organisation de l'opep.

l'OCDE: organisation pour la coopération et le développement économique.

CME : Conseil Français de l'Énergie.

TIC : technologies de l'information et de la communication.

PIB : le produit intérieur brut.

GTB : gestion technique du bâtiment.

MMAD : Méthodes multicritères d'aide à la décision.

MODM : Les méthodes d'aide à la décision multi-objectif.

MADM: Les méthodes d'aide à la décision multi- attributs.

SAW: méthode de la somme pondérée.

AHP: Processus de Hiérarchie Analytique.

TOPSIS: Technique pour l'Ordre de Préférence par Similarité de Solution Idéale.

PROMETHEE: Les méthodes de Préférence Ranking Organisation.

ELECTRE: ÉliminationEt choix Traduisant réalité

MAUT: Multi-attribute utility theory.

VIKOR: Multicriteria optimization and compromise solution.

MTEP : millions de tonnes d'équivalent pétrole.

GPL : gaz de pétrole liquéfié.

OPEC : organisation des pays exportateurs de pétrole.

LPC : lampe basse consommation.

EnR : énergie renouvelable.

OPGI : office promotion et gestion immobilier.

APRUE : l'agence nationale de promotion et de rationalisation de l'énergie

CIME : le Comité Intersectoriel de maitrise de l'énergie

CNERIB : le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du bâtiment

CDER : le Centre de Développement des Énergies Renouvelables

CNTTP : Le Centre National des Technologies de Production plus Propre

FNME : Le Fonds National de Maîtrise de l'Énergie

SDA : Sonelga distribution Alger

SDC : Sonelga distribution centre

SDE : Sonelga distribution est

SDO : Sonelga distribution ouest

SKS : Shari ket Kahraba Skikda

SKB : Shari ket Kahraba Berrouaghia

SKH : Shari ket Kahraba Hadjret Ennouss

SKT : Shari ket Kahraba Terga

SKD : Shari ket Kahraba de Koudiet Edraouch

Résumé

Les statistiques de ces dernières années indiquent que le secteur résidentiel est le plus grand consommateur d'énergie, car il est responsable de près de 43% de la consommation générale d'énergie en Algérie (selon les statistiques de APRUE). Cela est dû à l'augmentation de la croissance démographique et donc l'augmentation de la surface de parc résidentiel. Cette situation fait de l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments une nécessité incontournable.

D'autre part, l'efficacité énergétique dans les bâtiments résidentiels est un sujet de l'ère moderne que la plupart des pays tentent à surmonter et à atteindre en matière d'économie d'énergie, de lutte contre le réchauffement climatique et de conservation des sources d'énergies pour les générations futures.

La présente étude constitue en une contribution à la mise en place d'une méthodologie d'évaluation de l'efficacité énergétique 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 performance énergétique 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 l'efficacité énergétique. Le calcul des poids des indicateurs se fera par la méthode AHP.

Dans le but de démontrer la méthodologie développée, nous la confrontons avec deux cas d'études réels. Nous avons choisi deux bâtiments d'habitation (le premier cas est une maison individuelle et la deuxième est un bâtiment collective) dans la Wilaya de Bouira par rapport à la disponibilité des données nécessaires pour évaluer la performance globale. Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

Mots-clés : Performance énergétique, bâtiment d'habitation, indicateur de performance, méthode AHP, agrégation multicritère.

Abstract

The statistics of recent years indicate that the residential sector is the largest consumer of energy, as it is responsible for nearly 43% of general energy consumption in Algeria (according to APRUE statistics). This is due to the increase in population growth and therefore the increase in the surface area of the residential stock. This situation makes the evaluation of the energy performance of buildings an unavoidable necessity.

On the other hand, energy efficiency in residential buildings is a modern day issue that most countries are trying to overcome and achieve in terms of saving energy, fighting global warming and conserving energy sources for future generations.

This study is a contribution to the establishment of a methodology for assessing the energy efficiency 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 top-down diagnostic approach that aims to build a dashboard grouping the various indicators of energy performance of a building. The second is a multi-criteria aggregation based on the weighted sum method and aims at calculating the performance of the energy efficiency 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 two real case studies. We have chosen two residential buildings (the first case is an individual house and the second is a collective building) in the Wilaya of Bouira because of the availability of the necessary data to evaluate the overall performance. The results obtained are presented and discussed.

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

الملخص

تشير إحصاءات السنوات الأخيرة إلى أن القطاع السكني هو أكبر مستهلك للطاقة ، حيث أنه مسؤول عن ما يقرب من 43% من الاستهلاك العام للطاقة في الجزائر (حسب إحصائيات APRUE). ويرجع ذلك إلى زيادة النمو السكاني وبالتالي زيادة مساحة المخزون السكني. هذا الموقف يجعل تنفيذ أداء الطاقة للمباني ضرورة ال

مفر منه.

من ناحية أخرى ، نعتبر كفاءة استخدام الطاقة في المباني السكنية أحد مواضيع العصر الحديث الذي نحاول معظم الدول التغلب عليه وتحسينه في توفير الطاقة والتحكم في ظاهرة الاحتباس الحراري والحفاظ على مصادر الطاقة للأجيال القادمة.

هذه الدراسة هي مساهمة في وضع منهجية لتقييم كفاءة الطاقة في المباني السكنية في السياق الجزائري. نستخدم هذه المنهجية على نهجين تكامليين: النهج من أعلى إلى أسفل والنهج التصاعدي. الأول هو تشخيص وصياغة من أعلى إلى أسفل ويهدف إلى بناء لوحة معلومات تجمع بين المؤشرات المختلطة لتقييم أداء الطاقة لمبنى سكني. والثاني عبارة عن نهج من عدد المعايير نستخدم على طريقة المجموع المرجح ويهدف إلى حساب أداء معايير وأهداف كفاءة الطاقة. سيتم حساب أوزان المؤشرات بواسطة طريقة AHP.

من أجل توضيح المنهجية المطورة، نقوم بإجراء دراسة لحالتين حقيقيتين. حيث اخترنا مبنين سكنيين (الحالة الأولى بيت توندي والثانية مبنى جماعي) بولاية البويرة لتوفر البيانات اللازمة لتقييم الأداء العام. يتم عرض النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها

الكلمات المفتاحية: أداء الطاقة ، مبنى سكني ، مؤشر أداء ، طريقة AHP ، نهج من عدد المعايير

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le début de l'humanité, le premier homme s'est rendu compte à travers divers phénomènes naturels qu'il y avait quelque chose de caché derrière qui contribue à l'apparition et au mouvement de ces phénomènes (le départ de l'émergence du concept d'énergie). Et à cause de la nature curieuse de l'homme et de son amour pour la découverte et de l'augmentation de ses besoins quotidiens (agriculture, irrigation, industrie, etc.), d'une part, et à cause de la difficulté de l'exécution de ces besoins (il fait des grands efforts pour y à parvenir), d'autre part, il s'est rendu compte qu'il était nécessaire de trouver un produit vital pour satisfaire à ses besoins quotidiens. La poursuite constante de cette fin poussa l'homme à atteindre le concept de l'énergie qui est considéré comme un tournant qui a façonné l'homme moderne et a facilité sa vie et son développement dans tous les domaines.

L'énergie était développée au cours de l'histoire à partir de l'énergie humaine et animale, du vent, et de l'eau, du bois aux énergies fossiles et renouvelables. L'énergie a plusieurs utilisations selon les différents secteurs (transport, résidentiel, agricole, industrie). L'énergie se divise en deux types : l'énergie renouvelable (l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, biomasse) et l'énergie fossile (pétrole, gaz, charbon).

Le monde est confronté à une augmentation de la consommation énergétique d'une façon accrue depuis plusieurs décennies. Cette augmentation remet fondamentalement en cause le modèle économique qui est tributaire pour son développement d'une quantité colossale d'énergie. Le secteur du bâtiment est, parmi les secteurs économiques qui les plus grands consommateurs d'énergies au niveau mondial. Cette situation est le résultat de la forte demande de logement qui résulte d'une grande augmentation démographique et de la recherche de niveaux de confort supérieurs. À l'échelle planétaire, le secteur du bâtiment est très énergivore, en 2019, sa consommation s'élevait à plus de 43% de la consommation énergétique mondiale (AIE, 2019).

En Algérie, depuis environ deux décennies, le secteur du bâtiment et de la construction connaît une progression sans précédent. De nouveaux modèles de constructions étrangers se

sont généralisés sur tout le territoire algérien. Cette dynamique a fait du secteur résidentiel, l'un des secteurs les plus consommateur d'énergie et les plus pollueurs de l'environnement.

D'autre part, la majorité de l'énergie consommée en Algérie provient des combustibles fossiles (gaz et pétrole). Ces énergies ne sont pas renouvelables et sont appelées à s'épuiser à moyen terme. La consommation de telles énergies affecte négativement l'écosystème et accentue le changement climatique. Par conséquent la production de bâtiments économes en énergie (bâtiment efficace en énergie) qui utilisent une énergie respectueuse et plus propre de l'environnement est devenu l'un des plus grands défis de l'époque.

L'efficacité énergétique est vue comme un enjeu majeure et les bâtiments en sont une des composantes essentielles et ce sont les Etats qui sont les initiateurs des actions visant à favoriser son amélioration.

La performance énergétique des bâtiments vise à accomplir un triple défi : répondre au problème de la sécurité d'approvisionnement énergétique associé à la fluctuation des prix de l'énergie pour les nations dépendantes des ressources extérieures, et diminuer la consommation d'énergie dans toutes les secteurs notamment résidentiels, avec sans influence sur le taux de confort de ses occupants .et ensuite la lutte contre le changement climatique ([Ait Ahmed, 2017](#)).

Objectif et problématique de la recherche

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

Pour mener à bien cette méthodologie, un ensemble de défis et de problématiques sont à surmontés, à savoir :

- Difficulté d'accéder aux données de consommation énergétique et techniques auprès des organismes de l'Etat et auprès des occupants des bâtiments ;
- Difficulté de Quantifier l'ensemble des IPs en raison de la disponibilité des données ;
- Problématique du choix des coefficients de pondération en raison de la part de subjectivité du décideur ;
- Difficulté de mettre en place des échelles de performance dans le cas où celles-ci ne sont pas citées dans la littérature existante ;
- Difficulté de proposer des méthodes de calculs et des échelles de performance adéquates pour certains d'indicateurs de performance énergétique. ;
- Le choix de la méthode d'agrégation et de pondération des indicateurs en raison de leur diversité et de leur complexité.

Structure du mémoire

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

Le premier chapitre est dévissé en deux parties : La première est destinée à l'étude de la situation énergétique et de l'efficacité énergétique à l'échelle mondiale notamment dans le secteur résidentiel à travers l'expertise de multitude de travaux de recherche (publications scientifiques, thèses de doctorat, mémoires de magister, etc.). La deuxième partie sera dédiée aux méthodes multicritères d'aide à la décision.

A son tour, le deuxième chapitre sera aussi divisé en trois parties :

- Dans la première partie, nous allons présenter quelques informations statistiques sur le parc énergétique de l'Algérie (Réserves énergétiques, production des énergies, gouvernance du parc énergétique, etc.) ;
- Dans la deuxième partie, nous allons présenter quelques informations statistiques sur la situation énergétique dans le secteur résidentiel en Algérie ;
- Enfin, dans la troisième partie la politique de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables dans le secteur sera présentée.

Le troisième chapitre est le cœur de notre travail. La méthodologie que nous proposons est exposée. Notre méthodologie est combinée par deux approches complémentaires : l'approche descendante « Top-down » qui a pour but la définition des différents aspects et critères d'évaluation de la performance énergétique d'un bâtiment d'habitation. C'est une partie de diagnostic de la qualité énergétique des bâtiments d'habitation. Cette méthodologie nous a permis de recenser un ensemble d'IP pertinent pour les évaluations des performances des niveaux supérieurs. La deuxième approche ascendante dite « Bottom-up » a pour but pour l'évaluation des niveaux de performance de chaque critère d'évaluation retenu. Le processus d'agrégation multicritère que nous proposons utilise la méthode de la somme pondérée par la méthode AHP pour le calcul des coefficients de pondération.

Enfin, dans le chapitre quatre, la méthodologie développée ainsi que la base de données collectées seront appliquées sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans la région de Bouira. La programmation d'un outil informatique qui a pour but de simplifier les calculs sera développée sur le logiciel Visual Basic.

Chapitre 01

**Efficacité énergétique des
bâtiments d'habitation –
Bibliographie**

I.1 Introduction

L'énergie est un facteur déterminant pour la survie des sociétés et elle est indispensable à la satisfaction des besoins quotidiens, parce qu'elle est exploitée presque par toutes les activités humaines pour assurer le développement économique et social. En effet, cette énergie est majoritairement basée sur les combustibles fossiles (gaz, pétrole et charbon), ces énergies ne sont pas renouvelables et sont appelées à s'épuiser à moyen terme. Les énergies renouvelables (énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, biomasse, etc.), se présente comme une alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'environnement.

Le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus dynamiques dans le monde et notamment dans les pays émergents. Au cours des dernières décennies, le monde a connu de nombreux problèmes résultant de l'aggravation de la crise énergétique et de l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables. Étant donné que les secteurs des bâtiments sont les plus consommateurs d'énergie au monde, l'attention de nombreux pays du monde a été dirigée vers l'élaboration de plans et de politiques qui visent à rationaliser la consommation énergétique des différents ensembles urbains, notamment résidentiels, et à favoriser l'implantation d'ensembles urbains moins énergivores, s'appuyant majoritairement sur les énergies renouvelables.

Moins un bâtiment consomme d'énergie, plus son efficacité énergétique et donc sa performance énergétique sont élevées. L'efficacité énergétique dans le bâtiment est donc un indicateur précieux pour répondre en partie aux enjeux énergétiques actuels (économie des ressources, réduction des gaz à effet de serre et de l'empreinte carbone, utilisation d'énergies renouvelables, etc.).

Dans ce chapitre nous essayerons d'élaborer un bilan sur la l'efficacité énergétique dans le monde qui touche les statistique et les politiques, les enjeux mais aussi l'énergie dans le secteur résidentiel.

I.2 Définitions et terminologies

Nous commençons par définir quelques terminologies utiles à notre travail bibliographique et même pour le reste de l'étude.

I.2.1 Efficacité énergétique et performance énergétique – Quelle différence ?

Il existe plusieurs définitions de l'efficacité énergétique, les plus notoires sont :

- 1) C'est le rapport entre le service délivré au sens large (performance, produit, énergie, confort, service) et l'énergie qui y a été consacrée (Robillard, 2011).
- 2) C'est de réduire à la source la quantité d'énergie nécessaire pour un même service (Salomon et al., 2004).

- 3) L'efficacité énergétique se définit comme une consommation en énergie moindre pour le même service rendu (De Béthencourt et al., 2013).

Le groupe Afnor définit la performance énergétique comme étant : « Le résultats quantifiés de la consommation d'énergie d'une organisation, d'un bâtiment, d'une installation ou d'un produit. Dans le cadre de systèmes de management de l'énergie, les résultats peuvent être mesurés par rapport à la politique énergétique de l'organisation, à des objectifs énergétiques et des cibles énergétiques (Afnor, 2013).

A vrai dire, il n'y a pas de différence entre ces deux concepts, ils sont identiques et complémentaires.

La performance énergétique est déterminée par l'évaluation de l'efficacité énergétique pour un système spécifique (et dans notre cas il s'agit des bâtiments résidentiels). Donc pas de performance énergétique sans efficacité énergétique (www.xpair.com).

I.2.2 Et l'efficience énergétique ?

L'efficience énergétique désigne un paramètre qui exprime le rapport entre l'effet utile et l'énergie consommée, et qui fait appel aussi à la notion de coût ou de comportement. S'il s'agit de modifications techniques qui permettent de réduire la consommation pour un même effet utile (amélioration d'un procédé industriel, cogénération, etc.) on parle d'efficacité énergétique. Si la réduction de consommation provient de modifications de comportements, on parlera alors d'efficience énergétique (Recyconsult, 2010).

I.3 Situation énergétique mondiale – Statistiques

Dans ce paragraphe, nous essayerons de dresser un large éventail de statistiques sur la situation énergétique dans le monde. Nous détaillerons pour chaque type d'énergie sa consommation, ses réserves, ses domaines d'utilisation, etc. Ces connaissances sont nécessaires pour comprendre les enjeux actuels en terme de maîtrise d'énergies.

I.3.1 Énergies fossiles – Données et statistiques

On appelle « énergie fossile » l'énergie produite par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. Ces combustibles, riches en carbone et hydrogène, sont issus de la transformation de matières organiques enfouies dans le sol pendant des millions d'années (d'où le terme "fossiles"). Ce sont des énergies non renouvelables puisqu'une fois utilisées, elles ne peuvent être reconstituées qu'à l'échelle des temps géologiques (Journal planète énergies, 2016).

Naturellement présente dans le sous-sol de la terre, les énergies fossiles sont le type d'énergie le plus utilisé par l'être humain (à des fins de production, chauffage, transport, électricité, etc.). Leur production représente encore 85% de la production totale de l'énergie primaire mondiale selon l'Agence Internationale de l'Énergie.

1.3.1.1 Pétrole

Le pétrole, du latin Petra et oléum, soit « huile de pierre » est une huile minérale naturelle utilisée comme source d'énergie.

L'exploitation du pétrole comme source d'énergie, dite fossile, est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine. Dense, facilement stockable et transportable, le pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides (ConocoPhillips, 2002).

A. Consommation et production

Pour la première fois depuis 2009, la production mondiale de pétrole a diminué de 6,6 millions b/j en 2020, sous l'effet conjugué de l'OPEP (-4,3 millions b/j) et des pays non membres de l'OPEP (-2,3 millions b/j). La production n'a augmenté que dans quelques pays, principalement en Norvège (260 000 b/j) et au Brésil (150 000 b/j). La consommation de pétrole a également baissé pour la première fois depuis 2009, avec une chute massive de 9,1 millions b/j. Cette baisse a été enregistrée à la fois dans les pays de l'OCDE (-5,8 millions b/j) et dans les pays non membres de l'OCDE (-3,3 millions b/j). Les États-Unis (-2,3 millions b/j), l'Union européenne (-1,5 million b/j) et l'Inde (-480 000 b/j) ont enregistré les plus fortes baisses. La Chine est l'un des rares pays où la demande a augmenté en 2020 (220 000 b/j). (BP, 2021a).

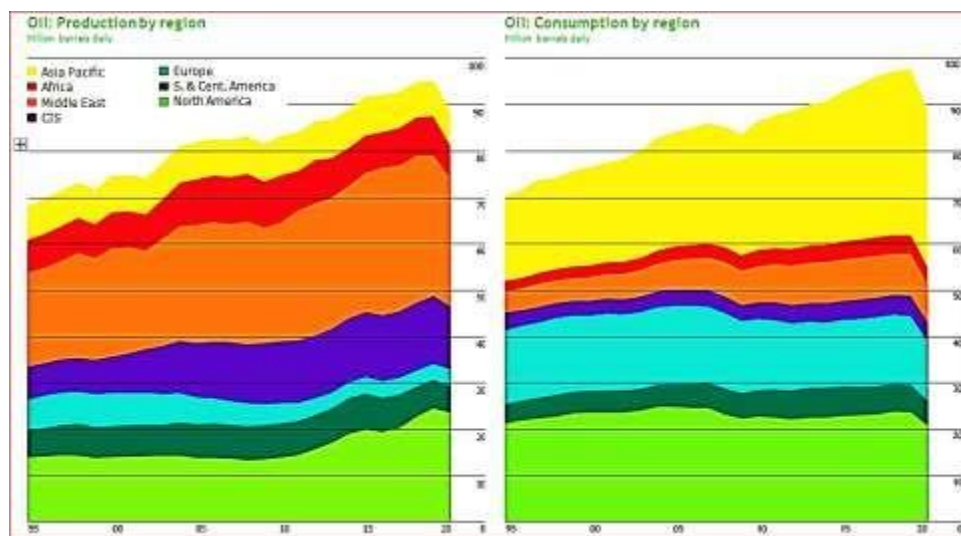


Figure I.1. Consommation et production du pétrole par régions (BP, 2021a)

B. Réserves

Les réserves mondiales prouvées de pétrole étaient de 1732 milliards de barils à la fin de 2020, en baisse de 2 milliards de barils par rapport à 2019. Le ratio R/P mondial montre que les réserves de pétrole en 2020 représentaient plus de 50 ans de production actuelle. L'OPEP détient 70,2 % des réserves mondiales (BP, 2021a). Les premiers pays en termes de réserves sont le Venezuela (17,5% des réserves mondiales), suivi de près par l'Arabie saoudite (17,2%) et le Canada (9,7%) (AIE, 2021).



Figure I.2. Ratios R/P du pétrole pour chaque région et classement des 10 principaux pays (unité : milliards de barils) (BP, 2021a ; AIE, 2021)

I.3.1.2 Gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile présent naturellement sous forme gazeuse dans les roches poreuses du sous-sol. Utilisé comme source d’énergie, Il est généré à partir de la sédimentation de matière organique vieille de plusieurs millions d’années (Connaissance des énergies, 2021).

A. Consommation et production

La consommation de gaz naturel a diminué de 2,3 %, soit 81 milliards de mètres cubes (mmc), une baisse similaire à celle observée en 2009 pendant la crise financière. La consommation de gaz a diminué dans la plupart des régions, à l’exception notable de la Chine où la demande a augmenté de 6,9 %. En revanche, la demande de gaz a diminué en Amérique du Nord et en Europe de 2,6 % et 2,5 % respectivement. La production de gaz a diminué de 123 milliards de m³ (-3,3 %), les baisses les plus importantes ayant été enregistrées en Russie (-41 milliards de m³) et aux États-Unis (-15 milliards de m³) (BP, 2021a).

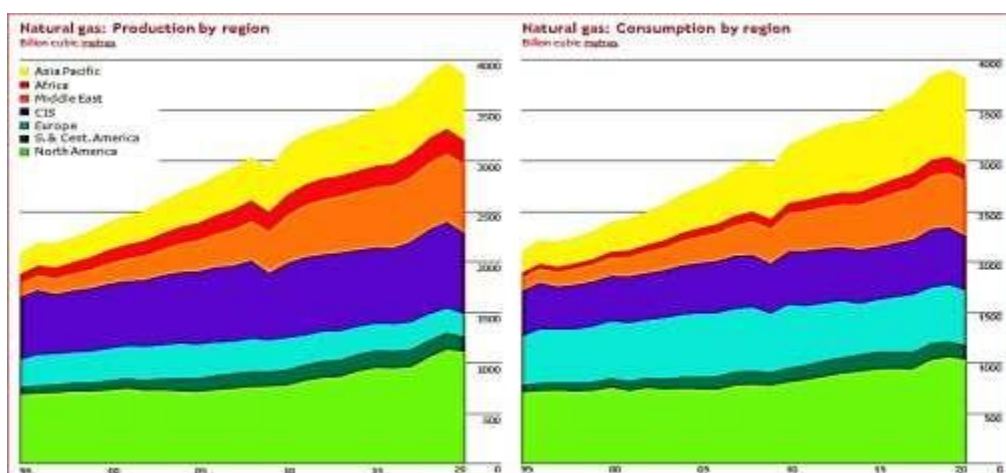


Figure I.3. Consommation et production du Gaz naturel pour chaque région (BP, 2021a)

B. Réserves

Les réserves mondiales prouvées de gaz ont diminué de 2,2 T m³ pour atteindre 188,1 T m³ en 2020. Une révision de l'Algérie (-2,1 T m³) a fourni la plus grande diminution, partiellement compensée par une augmentation de 0,4 T m³ des réserves canadiennes (BP, 2021a). La Russie (37 T m³), l'Iran (32 T m³) et le Qatar (25 T m³) sont les pays dont les réserves sont les plus importantes (AIE, 2021).

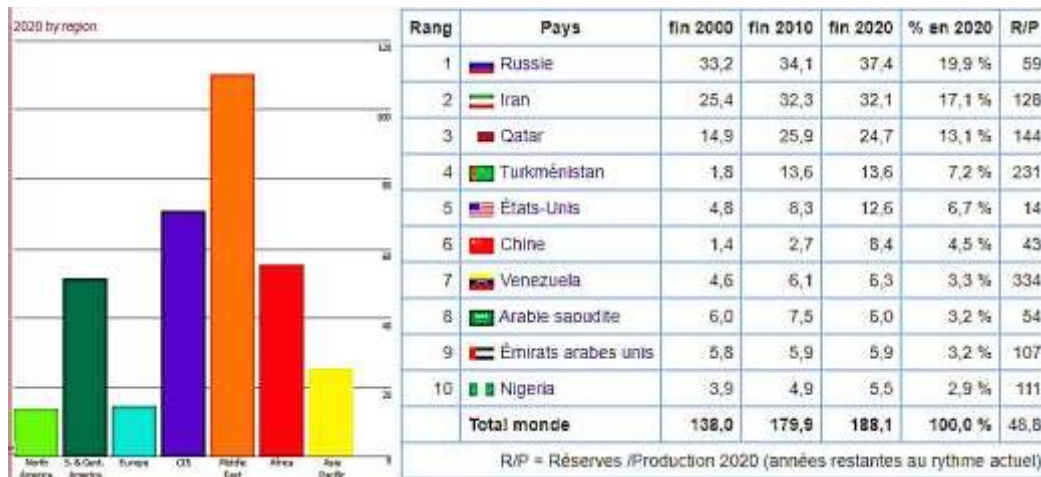


Figure I.4. Ratios R/P du gaz naturel pour chaque région et classement des 10 principaux pays (unité : Terra m³) (BP, 2021a ; AIE, 2021)

I.3.1.3 Charbon

Le charbon est un combustible fossile d'origine organique. Il est le résultat de la transformation de biomasse (résidus de forêts notamment) enfouie dans le sol au cours des temps géologiques. Par enfouissement, sous l'effet des pressions et des températures croissantes avec la profondeur, les végétaux ensevelis sont en effet décomposés puis transformés en une matière solide et combustible à haute teneur en carbone (Connaissance des énergies, 2021).

A. Consommation et production

La consommation mondiale de charbon a diminué de 4,2 %, soit sa quatrième baisse en six ans. Dans les pays non membres de l'OCDE, les seules augmentations notables de la consommation ont été observées en Chine (0,3 %) et en Malaisie (18,7 %), tandis que des baisses significatives de la consommation ont été enregistrées en Inde (-6,0 %) et en Indonésie (-4,9 %). La demande dans les pays de l'OCDE a fortement diminué, notamment aux États-Unis (-19,1 %) et en Corée du Sud (-12,2 %), pour atteindre le niveau le plus bas de notre série de données (qui remonte à 1965). La production mondiale de charbon a diminué de 5,2 %, la Chine étant la seule augmentation significative (1,2 %). Les plus fortes baisses de production ont également été enregistrées aux États-Unis (-25,2 %) et en Indonésie (-9,0 %). (BP, 2021a).

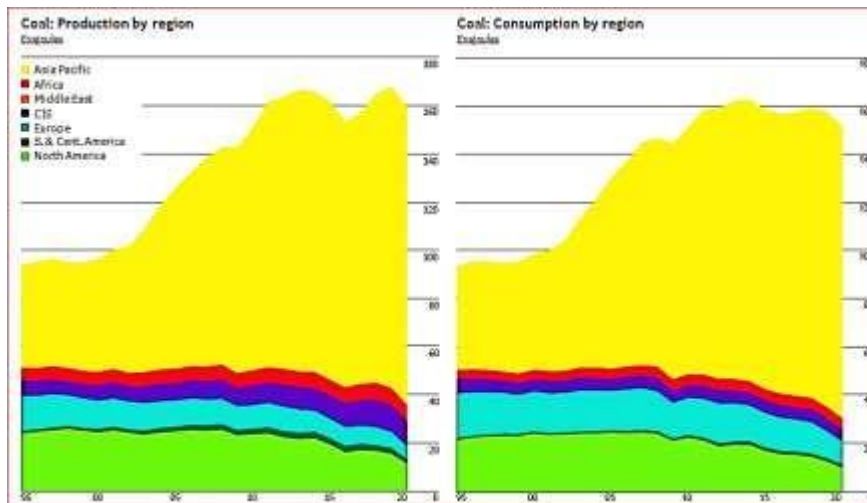


Figure I.5. Consommation et la production de charbon pour chaque région (BP, 2021a)

B. Réserves

Les réserves mondiales de charbon en 2020 s'élevaient à 1074 milliards de tonnes et sont fortement concentrées dans quelques pays seulement : États-Unis (23 %), Russie (15 %), Australie (14 %) et Chine (13 %). La plupart des réserves sont constituées d'anthracite et de bitume (70%). Le rapport R/P mondial actuel montre qu'en 2020, les réserves de charbon représenteront 139 ans de la production actuelle, l'Amérique du Nord (484 ans) et la CEI (367 ans) étant les régions présentant les rapports les plus élevés (BP, 2021a).



Figure I.6. Ratios R/P du charbon pour chaque région et classement des 10 principaux pays (unité : milliard de tonnes) (BP, 2021a ; AIE, 2021)

1.3.1.4 Énergie nucléaire

L'énergie de fission nucléaire est un cas particulier : les gisements exploitables connus seront épuisés dans, suivant les estimations et le développement de la consommation des pays orientaux (notamment en tenant compte des futures centrales qui seront construites en Chine et en Inde), 50 ans à un siècle, ce qui classe cette énergie dans la catégorie « non renouvelable » (Bouhdjar, 2012).

A. Le nucléaire et la production de l'électricité

Avec une production de 2 710 TWh en 2018 (soit 10,1 % de la production mondiale d'électricité), le nucléaire est la **3e source de production d'électricité dans le monde** (EDF 2022)

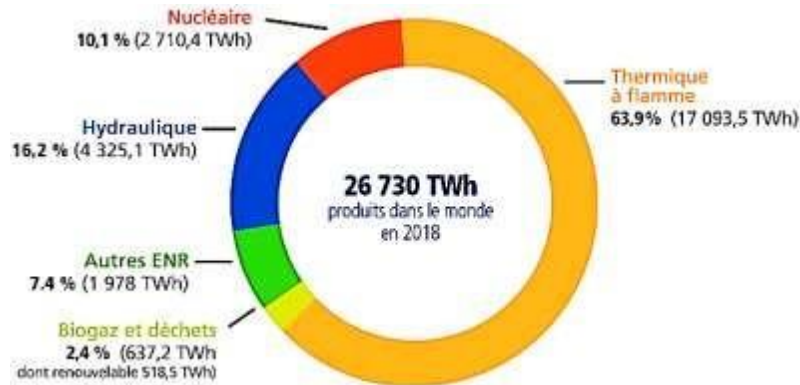


Figure I.7. Production de l'électricité dans le monde (IEA, 2018)

B. Consommation et réserves

La consommation nucléaire a chuté de 4,1 % (en équivalent-intrants), sa plus forte baisse depuis celle liée à Fukushima en 2011 et 2012. COVID-19 et le choc économique associé ont entraîné une baisse de la production d'électricité, la production nucléaire ayant le plus diminué en France (-0,4 EJ) et aux États-Unis (-0,2 EJ) (BP, 2021a).



Figure I.8. Consommation de l'énergie nucléaire par région et classement des 10 principaux pays (unité : milliers de tonnes) (BP, 2021a ; AIE, 2021)

1.3.1.5 Chiffres clés sur la consommation des énergies primaires dans le monde

A. Consommation mondiale d'énergie primaire par zone géographique

La consommation mondiale d'énergie primaire s'élève 14,3 Gtep en 2018. C'est deux fois plus qu'en 1978 (7,0 Gtep), soit une croissance annuelle moyenne de 1,8 % avec un léger ralentissement sur la dernière décennie (+ 1,5 %).

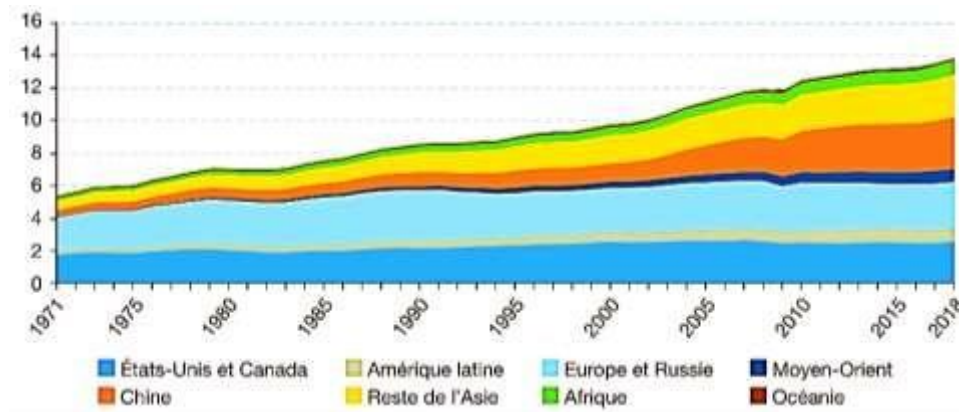


Figure I.9. Consommation mondiale d'énergie primaire par zone géographique (unité : Gtep)
(Commissariat général au développement durable, 2021)

B. Consommation mondiale d'énergie primaire par énergie

Les énergies fossiles dominent largement le mix énergétique primaire mondial en 2018 (81 %), même si leur part a légèrement reculé depuis 1978 (- 4 points). Sur toute cette période, produits pétroliers (31 % en 2018), puis charbon et gaz naturel (27 % et 23 %) sont restés, dans cet ordre, les trois premières sources d'approvisionnement. En 40 ans, la part des produits pétroliers a diminué de 14 points, alors que celles du gaz naturel et du charbon progressaient respectivement de 7 points et 3 points. La part de la biomasse et des déchets dans le mix énergétique est relativement stable, autour de 10 %. Celle de l'hydroélectricité l'est aussi, à hauteur en 2018 de 2,5 % de la consommation d'énergie primaire mondiale. La contribution du nucléaire a été multipliée par 2,1 en 40 ans, atteignant 4,9 % en 2018. La part des autres énergies (solaire, éolien, géothermie) est passée de 0,1 % à 2,0 % en 40 ans.

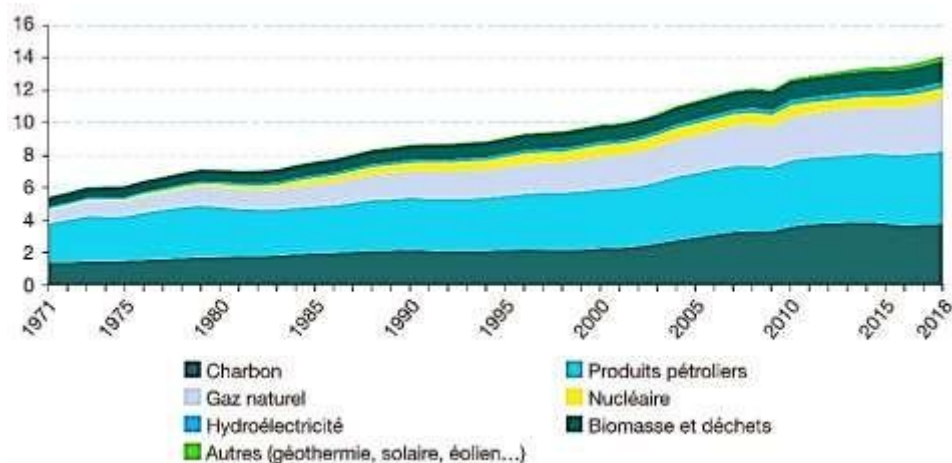


Figure I.10. Consommation mondiale d'énergie primaire par type d'énergie (unité : Gtep)
(Commissariat général au développement durable, 2021)

C. Consommation finale d'énergie par continent

La consommation finale mondiale repose en 2018 à 41 % sur les produits pétroliers, soit un recul de 7 points par rapport à 1978. Les parts du charbon et de la biomasse se sont aussi

réduites, passant toutes les deux de 13 % à 10 % sur ces 40 ans. Ces reculs se sont faits au profit de l'électricité, passée sur la même période de 10 % à 19 %, et, dans une moindre mesure, du gaz naturel (de 14 % à 16 %). Les énergies fossiles représentent en 2018 environ deux tiers de la consommation finale sur tous les continents, à l'exception de l'Afrique où la biomasse est majoritaire (51 %).

Le pétrole est partout la première énergie fossile. Le charbon est beaucoup utilisé en Asie (19 %), alors que d'autres continents ont davantage recours au gaz naturel (21 % en Amérique, 26 % en Europe). La part de l'électricité dans la consommation finale en 2018 est similaire dans tous les continents (autour de 20 %), à l'exception de l'Afrique (10 %).

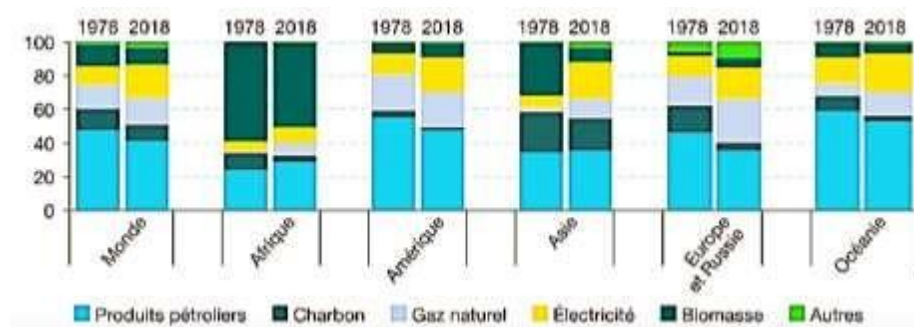


Figure I.11. Consommation mondiale d'énergie primaire par type d'énergie (unité : Gtep)
(Commissariat général au développement durable, 2021)

I.3.2 Énergies renouvelables – Données et statistiques

Une énergie renouvelable est une source énergétique se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique). Ces énergies sont alors issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants qui les rendent inépuisables.

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO₂, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles. (Robert, 2008).

Le bilan carbone des énergies renouvelables est par conséquent très faible et elles sont, contrairement aux énergies fossiles, un atout pour la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique (Connaissance des énergies, 2021).

Les sources des énergies renouvelables sont principalement :

- L'énergie éolienne ;
- L'énergie solaire ;

- L'énergie hydraulique ;
- L'énergie de biomasse et,
- L'énergie géothermique.

I.3.2.1 Production des énergies renouvelables par source

La courbe de la Figure I.12 montre que l'énergie solaire domine la production énergétique d'origine renouvelable dans le monde suivi par l'énergie de vent qui a contribué dans la croissance de production d'électricité de 173TW/H (BP, 2021a).

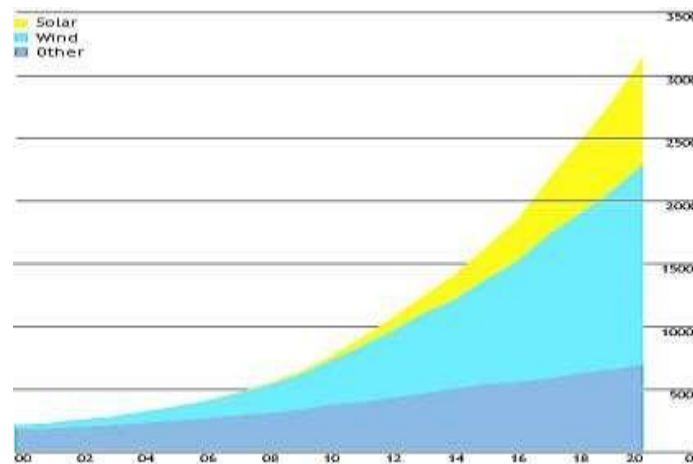


Figure I.12. Production d'énergies renouvelables par source (BP, 2021a).

I.3.2.2 Consommation des énergies renouvelables par région

La chine représente aujourd'hui le plus grand consommateur de l'énergie dans le monde y compris les énergies renouvelables à cause de l'augmentation de la population et le développement dans le domaine industriel suivi puis les USA, le japon, l'inde et l'Allemagne.

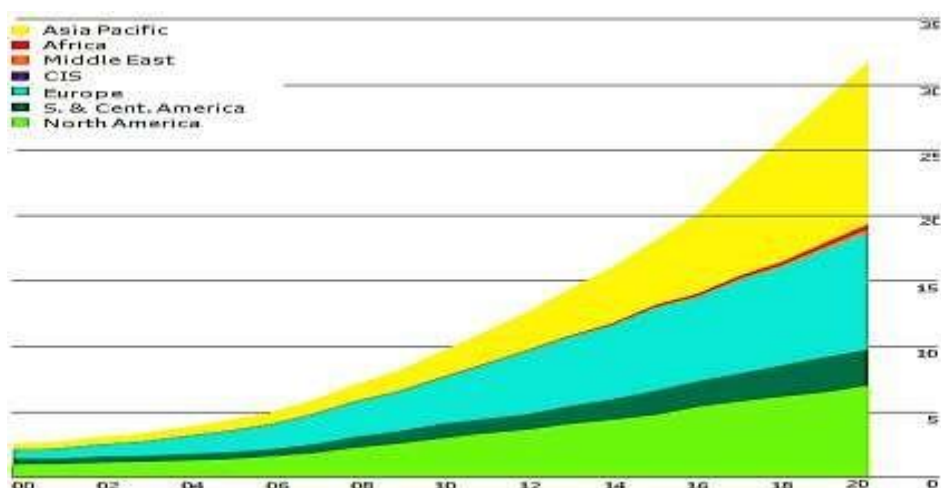


Figure I.13. Consommation d'énergies renouvelables par région (BP, 2021a).

I.3.3 Qui consomme le plus d'énergie ?

La réponse dépend du type d'énergie. Tandis que les États-Unis consomment le plus de pétrole, la Chine est la plus grande utilisatrice d'électricité. Pour le moment, la famille chinoise moyenne consomme moins d'électricité qu'une famille nord-américaine. Mais avec la prospérité croissante de pays comme la Chine et l'Inde, de plus en plus de gens adoptent les modes de vie de la classe moyenne, ce qui va faire grimper la demande d'énergie.

Du fait que chaque pays utilise différents types d'énergie, il est difficile de dire lequel en consomme le plus. Le Canada a lui-même recouru à un mélange complexe de pétrole, de gaz naturel, d'hydroélectricité, de nucléaire et d'autres sources d'énergie.

Quelle que soit la source d'énergie, la demande est en croissance. La population mondiale devrait encore gagner 2 milliards d'êtres humains au cours des deux prochaines décennies, et avec l'amélioration des niveaux de vie, on estime que d'ici 2040, la production d'électricité devrait augmenter de 52% (CAPP, 2022).

À l'heure actuelle, les énergies fossiles représentent 80 % de l'énergie consommée. Le reste provient de sources diverses comme le nucléaire, les biocarburants, l'hydroélectricité, le solaire, l'éolien et la géothermie (CAPP, 2022).

I.4 Situation énergétique mondiale – Perspectives

Le monde s'attend, dans l'avenir, à une augmentation de la demande d'énergie et cela à cause de plusieurs raisons (BP, 2012) :

- Accroissement de la population (9 à 10 milliards d'habitants à l'horizon 2050) ;
- Effort des pays en voie de développement pour combler leur décalage économique (croissance de 8% à 10 % en Chine et en Inde) ;
- Maintien d'une légère croissance de la demande énergétique dans les pays développés.

I.4.1 Perspectives des besoins énergétiques mondiaux

Environ 100 millions de barils de pétrole sont actuellement consommés chaque jour dans le monde. Bien que l'Agence internationale de l'énergie prévoie un usage croissant des énergies renouvelables, des progrès en efficacité énergétique, et un plus grand nombre de véhicules électriques, le pétrole va continuer de répondre à la demande croissante dans les transports et l'industrie pétrochimique, dont proviennent de nombreux produits de tous les jours comme les téléphones mobiles ou les chaussures de sport.

La demande en gaz naturel va également croître dans les pays qui cherchent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et à remplacer le charbon dans leurs centrales thermiques. Économique, abondant et fiable, le gaz naturel génère de 40 à 65 % moins d'émissions que le charbon (CAPP, 2022).

I.4.2 Sources d'énergies davantage consommées à l'horizon 2050

Selon le scénario de référence de l'[Agence internationale de l'énergie](#), la demande mondiale va augmenter pour toutes les sources d'énergie, y compris fossiles (même si les énergies renouvelables devraient connaître la plus forte croissance sur la période). En 2050, les énergies fossiles pourraient encore compter pour 69% de la consommation mondiale d'énergie primaire, contre 80% en 2018 ([IEA, 2019](#)).

Le charbon, fréquemment montré du doigt pour les fortes émissions de CO₂ associées à sa combustion, pourrait voir sa consommation mondiale « *décliner jusqu'à la décennie 2030* » (avec une transition vers le gaz et les énergies renouvelables dans le secteur électrique) mais à nouveau augmenter dans les années 2040 pour satisfaire des besoins industriels mais aussi de production d'électricité dans les pays asiatiques hors Chine ([IEA, 2019](#)).

Selon l'[Agence internationale de l'énergie](#), les émissions mondiales de CO₂ relatives à l'énergie pourraient ainsi augmenter de 0,6% par an en moyenne entre 2018 et 2050 (contre + 1,8% en moyenne entre 1990 et 2018), bien loin des ambitions affichées pour lutter contre le réchauffement climatique. Si les progrès d'efficacité énergétique et le remplacement partiel du charbon par des filières moins carbonées dans le secteur électrique pourrait avoir un effet positif à court terme, l'[Agence internationale de l'énergie](#) souligne le fort impact sur ces émissions de la croissance démographique et économique à plus long terme ([IEA, 2019](#)).

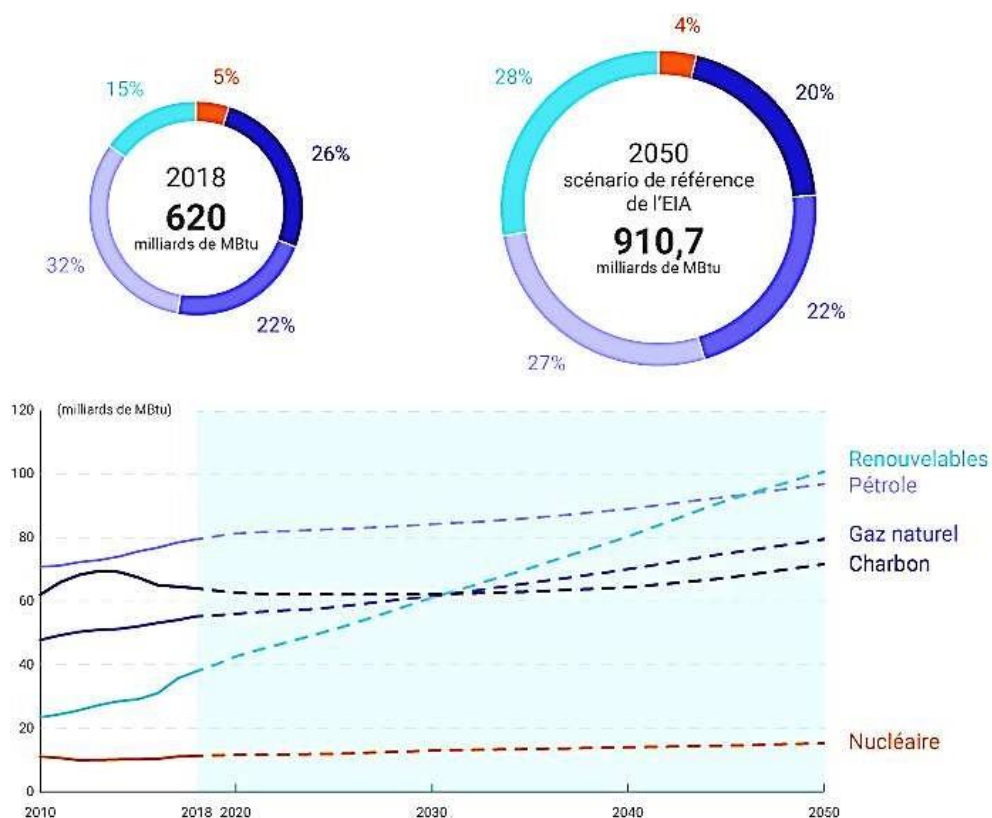


Figure I.14. Évaluation de la consommation d'énergie primaire par source (IEA, 2019)

La part du pétrole et des autres hydrocarbures liquides pourrait encore compter pour 27% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 2050, contre 32% en 2018 selon le scénario de référence de l'Agence internationale de l'énergie (IEA, 2019).

I.4.3 Consommation d'énergie par secteur

La force et la composition de la croissance énergétique au cours des 30 prochaines années dépendent essentiellement de la manière dont l'énergie est utilisée dans les principaux secteurs de l'économie. Les Figures I.15 et I.16 présentent des chiffres clés des perspectives de la consommation énergétique à l'horizon 2050.

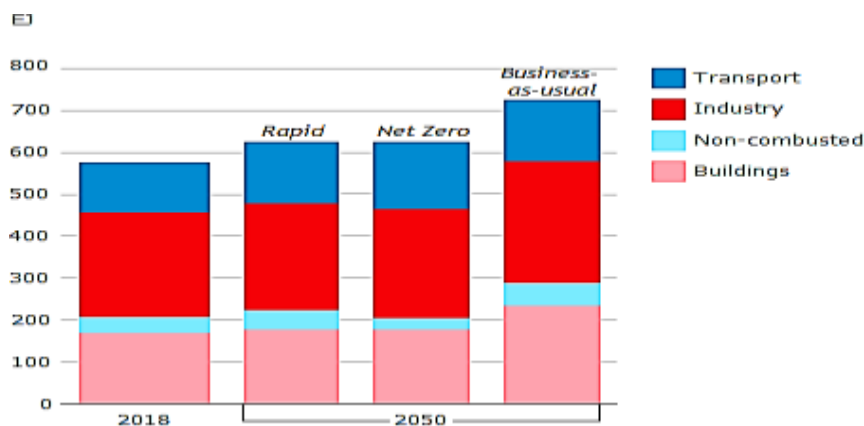


Figure I.15. Consommation d'énergie primaire par secteur d'utilisation finale.

Le secteur industriel (à l'exclusion de l'utilisation non brûlée de combustibles) a consommé environ 45 % de l'énergie mondiale en 2018. L'utilisation non brûlée de combustibles représentant environ 5 % supplémentaires. Le reste a été utilisé au sein des bâtiments résidentiels et commerciaux (29%) et des transports (21%).

Les perspectives pour l'énergie primaire dépendent également de la forme sous laquelle cette énergie est utilisée au point final de consommation. En particulier, bien qu'il soit possible de décarboniser la production d'électricité et d'hydrogène, ils nécessitent des investissements considérables de l'énergie primaire à produire. Par conséquent, l'augmentation de l'utilisation de ces formes de vecteurs énergétiques tend à accroître l'énergie primaire.

En Rapide (Figure I.16) la croissance de l'énergie primaire utilisée dans les trois secteurs ralentit par rapport aux 20 dernières années. Ce ralentissement est le plus marqué dans les secteurs de l'industrie et du bâtiment. L'énergie primaire utilisée dans ces deux secteurs diminue dans la seconde moitié de la perspective. En revanche, l'énergie primaire utilisée dans les transports augmente tout au long de la période considérée. En revanche, l'énergie primaire utilisée dans le secteur des transports augmente tout au long de la perspective - représentant près de 60 % de l'augmentation totale de l'énergie primaire dans le secteur du transport rapide - grâce à un recours accru à l'électricité et à l'hydrogène. Cet hydrogène peut être utilisé soit directement, soit combiné avec du carbone ou de l'azote pour en faciliter le transport.

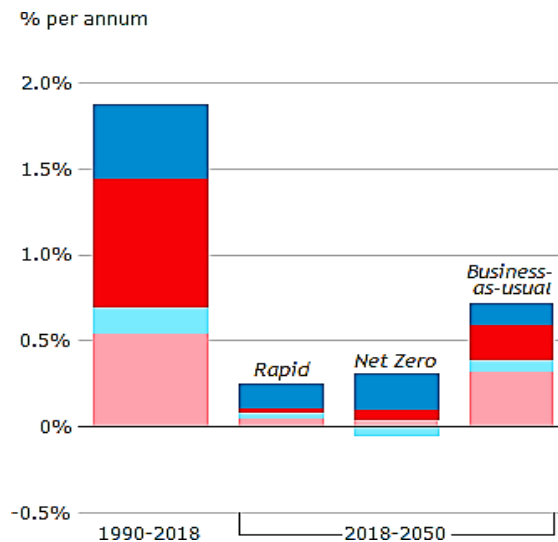


Figure I.16. Croissance annuelle de la demande et contributions des secteurs.

L'utilisation de l'électricité et de l'hydrogène augmente encore plus dans le scénario "net zéro", en particulier dans les transports et l'industrie. Par conséquent, même si le rythme des gains d'efficacité sous-jacents dans ces deux secteurs est plus rapide que dans Rapid, l'augmentation de l'énergie primaire est un peu plus importante. L'énergie primaire utilisée dans les bâtiments en 2050 reste largement inchangée par rapport à son niveau actuel.

En revanche, l'utilisation de l'énergie primaire augmente sensiblement dans les trois secteurs dans le scénario BAU, mais à un rythme nettement plus lent qu'au cours des 20 dernières années. Mais beaucoup plus lentement qu'au cours des 20 dernières années. Ce ralentissement est le plus marqué dans l'industrie et les transports, l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments et le secteur non brûlé représentant ensemble environ la moitié de la hausse de la consommation d'énergie primaire et le secteur des non-combustibles représentant ensemble environ la moitié de l'augmentation de la consommation d'énergie primaire.

I.5 Efficacité énergétique à l'échelle mondiale – Politique, enjeux, développements et tendances

Le [Conseil Mondial de l'Énergie](#) et l'[ADEME](#), avec le soutien technique d'[ENERDATA](#) établissent un rapport d'étude triennal. Lancé en 1992, est axé sur l'identification, la documentation et l'évaluation des politiques et tendances d'efficacité énergétique à travers le monde. Le présent rapport couvre 85 pays (Figure I.17) qui représentent plus de 90% de la consommation mondiale d'énergie ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)).



Figure I.17. Pays concernés par l'enquête du CME (Chicago Mercantile Exchange) sur les politiques d'efficacité énergétique

Basée sur une large couverture géographique et sur l'analyse des corrélations entre indicateurs d'efficacité énergétique et mesures et politiques, l'étude adopte une approche originale de l'évaluation des interactions entre les politiques d'efficacité énergétique et les performances d'efficacité énergétique des économies nationales. L'efficacité énergétique contribue à résoudre le « **trilemme énergétique** », c'est-à-dire la sécurité énergétique, l'atténuation des impacts sur l'environnement et la justice sociale. L'amélioration de l'efficacité énergétique permet de réaliser des économies d'énergie et d'atténuer les impacts de la production et de l'utilisation de l'énergie sur l'environnement.

Bien que l'efficacité énergétique présente des avantages évidents et un potentiel d'amélioration significatif, les progrès à ce jour ne sont pas à la hauteur des attentes. Aussi est-il important d'identifier les facteurs responsables de la lenteur des progrès. Le premier objectif de cette étude est d'examiner les dernières tendances d'efficacité énergétique dans les pays membres du CME. Un certain nombre d'indicateurs ont été choisis et utilisés à cet effet ; ils sont disponibles sur le site du CME. Ces indicateurs font l'objet d'un examen rigoureux et d'une comparaison par région.

Le deuxième objectif de l'étude est de décrire et d'évaluer les politiques d'efficacité énergétique mises en œuvre dans un grand nombre de pays. Toutes les informations détaillées relatives à la mise en œuvre des politiques d'efficacité énergétique sont disponibles sur le site du CME. En outre, comme pour les précédents rapports, des études de cas approfondies ont été réalisées par des experts dans les secteurs concernés ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)).

I.5.1 Enjeux et politiques

Les principales enjeux et mesures de la démarche de l'efficacité énergétique sont principalement résumé par le rapport en :

- Les dispositifs de financement innovants pour les bâtiments ;
- Les mesures visant à accélérer la pénétration de systèmes de climatisation efficaces et leur utilisation rationnelle ;

- La facturation intelligente ;
- Les mesures visant à améliorer l'efficacité du transport routier de marchandises.

L'étude cependant, ne se limite pas à un simple examen des politiques et mesures d'efficacité énergétique déjà mises en œuvre. Elle présente également les résultats d'une évaluation approfondie de ces politiques et identifie les expériences les plus intéressantes afin de tirer des conclusions générales sur les avantages et les insuffisances des différentes politiques. Les informations contenues dans ce rapport devraient permettre aux gouvernements engagés dans l'élaboration de politiques et programmes de gestion de la demande d'énergie de tirer parti de l'expérience d'autres pays ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)).

L'étude se conclut par un résumé de neuf recommandations principales ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)) :

- Les prix de l'énergie devraient refléter le coût de l'approvisionnement énergétique afin d'envoyer aux consommateurs les bons signaux de prix ;
- Les consommateurs ont besoin d'informations pour prendre des décisions éclairées ;
- La facturation intelligente représente un important potentiel d'économies d'énergie ;
- Des outils de financement innovants sont nécessaires afin de soutenir les investissements des consommateurs ;
- La qualité des équipements et services d'efficacité énergétique devrait être contrôlée ;
- Les réglementations devraient être correctement appliquées et régulièrement renforcées ;
- Le comportement des consommateurs devrait être analysé et pris en compte, en particulier l'utilisation croissante des TIC (technologies de l'information et de la communication) ;
- Il est nécessaire de surveiller les tendances d'efficacité énergétique afin de pouvoir évaluer l'impact réel des politiques d'efficacité énergétique ;
- Enfin, la coopération internationale et régionale dans le domaine de l'efficacité énergétique devrait être améliorée. Cependant, de nombreuses mesures d'efficacité énergétique nécessitent un investissement initial et, dans certains cas, l'investisseur ne rentabilise pas pleinement cet investissement, ce qui constitue un obstacle à la mise en œuvre rentable des mesures d'efficacité énergétique.

I.5.2 Politiques et tendances d'efficacité énergétique par région

Au cours des trois dernières décennies, la plupart des pays ont réduit de façon significative leur utilisation totale d'énergie par unité de PIB. La diminution de l'intensité énergétique s'explique en grande partie par une efficacité énergétique accrue dans les principales utilisations finales telles que les véhicules, les appareils électriques, le chauffage et les processus industriels. Les gouvernements ont mis en œuvre un large éventail de politiques et

programmes, tels que les normes d'efficacité énergétique, les campagnes de sensibilisation, les obligations pour les acteurs du marché et les incitations financières, afin d'accélérer l'élaboration et l'adoption de mesures d'efficacité énergétique. Ces politiques et programmes ont contribué à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les pays de l'OCDE, ainsi qu'à un développement technologique continu, en réponse à la hausse des prix de l'énergie et à la concurrence accrue contraignant les entreprises à réduire les coûts énergétiques (Conseil Français de l'Énergie, 2013).

L'Europe occidentale est aujourd'hui la région enregistrant la plus faible intensité énergétique, bien que comptant dans ses rangs de grands pays consommateurs ; **la CEI utilise presque 3 fois plus d'énergie par unité de PIB que l'Europe**. En Chine, en Afrique et au Moyen-Orient, l'intensité énergétique est deux fois supérieure à la moyenne en Europe. L'Amérique latine et l'Asie & Pacifique OCDE se situent à environ 15% au-dessus du niveau européen, tandis que l'Inde et les autres pays d'Asie se situent au même niveau que la moyenne mondiale avec une intensité énergétique 50% supérieure à celle de l'Europe et légèrement inférieure à celle de l'Amérique du Nord (Conseil Français de l'Énergie, 2013).

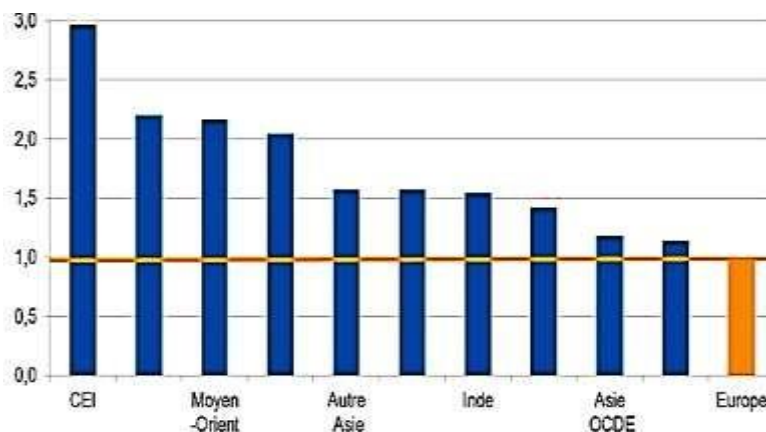


Figure I.18. Intensité énergétique primaire à parités de pouvoir d'achat

L'Union européenne s'est dotée d'un arsenal législatif (directives) destiné à promouvoir l'efficacité énergétique (EPBD, Eco-conception, Eco-étiquetage, directive relative à l'efficacité énergétique, normes d'émissions de CO₂ pour les véhicules, etc.). Chaque état membre a pris des engagements forts en faveur de l'efficacité énergétique, comme en attestent les objectifs indicatifs nationaux pour 2020, les stratégies à long terme pour la rénovation des bâtiments et d'autres initiatives. Le secteur public peut montrer l'exemple.

Outre toutes ces initiatives, l'UE élabore d'autres mesures innovantes dans le cadre de la nouvelle directive sur l'efficacité énergétique qui inclut : les mécanismes d'obligations en matière d'efficacité énergétique (ou mesures alternatives) visant à réaliser de nouvelles économies d'énergie correspondant à 1,5 % de l'utilisation finale totale annuelle sur la période 2014-2020 ; la création d'un registre national de fournisseurs de services énergétiques ; la mise en place de compteurs individuels et d'une facturation fréquente et précise ; des audits réguliers et obligatoires pour les grandes entreprises ; des objectifs obligatoires pour les bâtiments publics et des incitations pour les PME (Conseil Français de l'Énergie, 2013).

Selon le rapport du CME *Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050 – Mises en musique du futur de l'énergie*, la demande énergétique mondiale augmentera d'un tiers entre 2010 et 2035, et 90% de cette augmentation se produira hors de l'OCDE. La Chine et l'Inde contribuent pour plus de la moitié à l'augmentation de la demande énergétique. La Chine représente à elle seule près du tiers de cette augmentation. Néanmoins, en Chine, la consommation énergétique par habitant en 2035 restera inférieure au niveau de consommation des États-Unis ou de l'Australie. Dans les pays non membres de l'OCDE, le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique, souvent en raison des subventions aux carburants et des barrières institutionnelles, n'est pas, même partiellement, atteint (Conseil Français de l'Énergie, 2013).

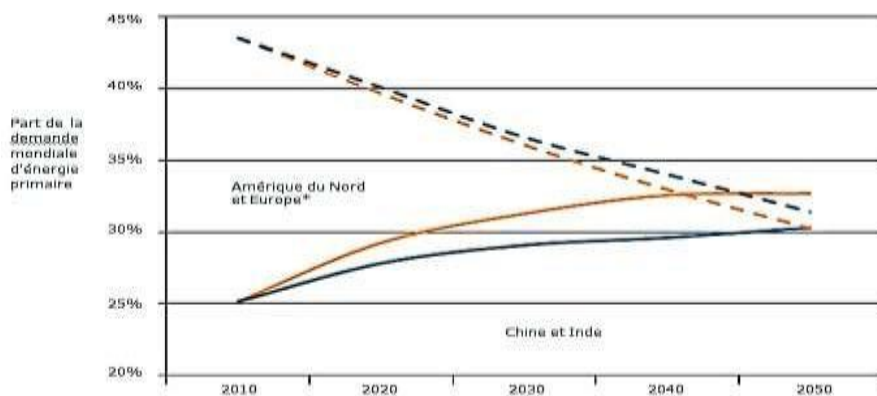


Figure I.19. Intensité énergétique primaire à parités de pouvoir d'achat

I.5.3 Politiques et tendances d'efficacité énergétique par secteur

La tendance générale dans l'industrie est à une diminution de l'énergie requise par unité de valeur ajoutée (intensité énergétique industrielle) dans toutes les régions, à l'exception du Moyen-Orient. Cependant, depuis 2000, c'est-à-dire le début de la crise économique mondiale, on observe un net ralentissement de la réduction de l'intensité énergétique dans la plupart des régions et à l'échelle mondiale (Figure I.20).

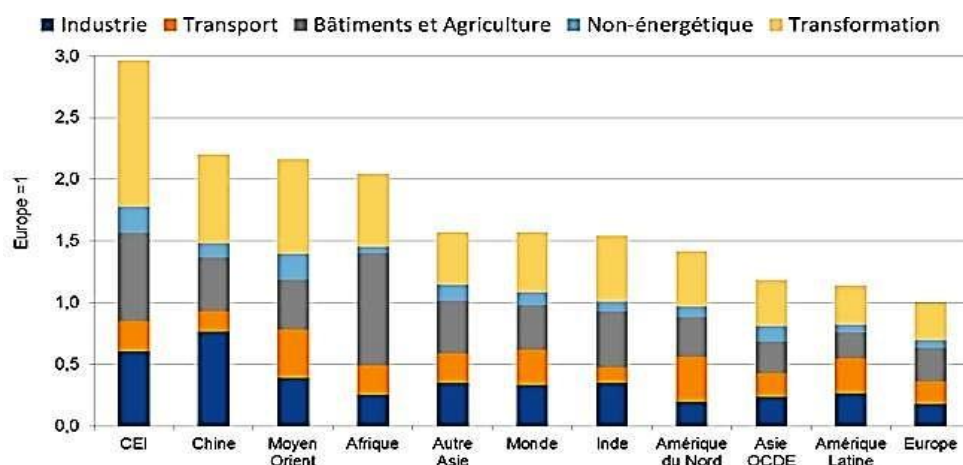


Figure I.20. Décomposition de l'intensité énergétique primaire par secteurs industriels

- **Industrie** : Les tendances en termes d'intensité énergétique sont également influencées par les gains d'efficacité énergétique au niveau de chaque branche industrielle (par exemple : sidérurgie, chimie, minerais non métalliques) et par l'évolution de la structure de la valeur ajoutée industrielle. En effet, le secteur de l'industrie englobe un large éventail de sous-secteurs avec différentes intensités énergétiques. Les politiques visant à améliorer l'efficacité énergétique dans l'industrie sont conçues dans un souci de flexibilité, en tenant compte des différents besoins de l'industrie. La mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique doit prendre en considération la concurrence mondiale, particulièrement en période de crise économique. Les politiques d'efficacité énergétique industrielle privilégient de plus en plus les instruments politiques flexibles, comme les accords volontaires, plutôt que les réglementations ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)).
- **Transport** : est largement reconnu que le transport est l'un des secteurs dans lequel il est le plus difficile d'améliorer l'efficacité énergétique et de ralentir l'augmentation de la demande énergétique. L'intensité énergétique des transports diminue dans la plupart des régions et dans le monde, ce qui signifie que la consommation d'énergie des transports croît plus lentement que le PIB. Dans les pays de l'OCDE, la réduction de l'intensité énergétique des transports s'explique par la combinaison de deux principaux facteurs : l'augmentation plus faible du taux d'équipement en automobiles et du trafic, due à un effet de saturation et à des capacités routières limitées, et la rapide amélioration de l'efficacité énergétique des nouvelles voitures liée aux mesures existantes ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)).
- **Bâtiments résidentiels et non résidentiels** : représentent le plus grand secteur d'utilisation finale d'énergie et la cible principale en matière d'efficacité énergétique. La consommation finale d'énergie des bâtiments a augmenté au niveau mondial de l'ordre de 1% par an depuis 2005 et de 3% par an pour l'électricité. On constate toutefois une tendance à la baisse de la consommation d'énergie par ménage (- 0,8% par an au niveau mondial). Dans les pays de l'OCDE, le principal moteur d'amélioration de l'efficacité énergétique pour le chauffage et les appareils a été la mise en œuvre de codes de construction plus stricts et de la norme MEPS (*Minimum Energy Performance Standard*). Par ailleurs, les pays de l'OCDE recourent à de multiples incitations financières afin d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, la plupart d'entre eux proposant des prêts à faibles taux d'intérêt souvent combinés à des subventions pour la rénovation des bâtiments existants. Dans les économies émergentes, la substitution de la biomasse par des combustibles modernes joue un rôle majeur. Les codes de construction se généralisent pour les bâtiments neufs.

Les politiques ciblent à grande échelle les appareils électriques : les mesures les plus courantes sont l'étiquetage, avec un nombre croissant d'appareils dotés d'une étiquette d'efficacité énergétique, et le recours de plus en plus répandu à la norme MEPS. L'utilisation des normes et de l'étiquetage constitue un moyen économique de

remédier aux défaillances du marché dans la vente d'appareils et d'équipements efficaces.

La climatisation devient une priorité car cette application d'utilisation finale croît très rapidement dans la plupart des pays émergents. Malgré tous les efforts déployés à ce jour, il existe encore un fort potentiel d'économies d'énergie dans tous les secteurs, en particulier dans le secteur des bâtiments existants. Il est recommandé aux gouvernements de mettre en œuvre un ensemble de politiques afin d'accroître l'efficacité énergétique des bâtiments existants et d'assurer la conformité aux mesures mises en œuvre. Afin d'assurer l'efficacité des mesures, les programmes d'étiquetage et les normes de performance énergétique doivent être correctement appliqués (Conseil Français de l'Énergie, 2013).

I.5.4 Evaluation des politiques et tendances d'efficacité énergétique

L'évaluation d'une sélection de politiques et mesures d'efficacité énergétique à travers le monde réalisée dans le cadre du rapport contribue aux débats en cours sur le véritable potentiel de gains d'efficacité énergétique et le meilleur moyen de les atteindre. Quelle est l'importance des mesures d'efficacité énergétique ? Quelles sont les priorités ? Quelles sont les tendances dans la mise en œuvre des politiques ? Quelles sont les mesures populaires et pourquoi ? Quelles sont les mesures innovantes ? Quels sont les résultats ? Quelles sont les mesures rentables ? Le rapport permet, entre autres, de trouver des réponses à ces questions.

I.5.4.1 Economies d'énergie au niveau mondial

L'amélioration de l'intensité énergétique primaire entre 1990 et 2011 a permis d'économiser 4,2 Gtep en 2011. L'intensité énergétique finale au niveau mondial a baissé plus rapidement que l'intensité énergétique primaire (1,6% par an contre 1,3% par an entre 1990 et 2011). En d'autres termes, la productivité de l'énergie a enregistré une amélioration de 20% plus rapide au niveau de la consommation finale qu'au niveau global (Conseil Français de l'Énergie, 2013).

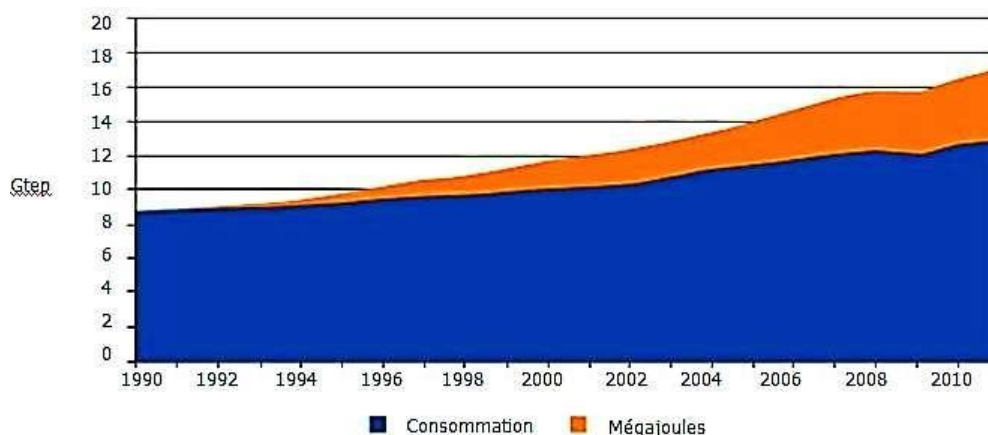


Figure I. 21. Les économies d'énergie au niveau mondial

1.5.4.2 Rapport de l'efficacité énergétique au niveau de la consommation finale et l'augmentation des pertes de conversion

L'intensité énergétique finale au niveau mondial a diminué plus rapidement que l'intensité énergétique primaire (1,6% par an contre 1,3% par an entre 1990 et 2011). En d'autres termes, 20% des gains de productivité énergétique au niveau de la consommation finale dans le monde ont été annulés par une augmentation des pertes de conversion énergétique, principalement dans la production d'électricité (66% dans l'Asie OCDE, 33% dans la CEI, 36% en Inde).

Ces pertes croissantes sont dues non pas à une moindre efficacité de la production d'électricité, mais à la rapide augmentation de la demande d'électricité au niveau de l'utilisation finale, car l'électricité est produite en grande partie par des centrales thermiques avec 60-70% de pertes de conversion. La part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie, au niveau mondial, a augmenté de 13% en 1990 à 18% en 2011. En Chine et dans les autres pays d'Asie, la pénétration de l'électricité a été particulièrement rapide (de 5 à 20% en Chine ou de 8% à 15% dans les autres pays d'Asie) ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)).

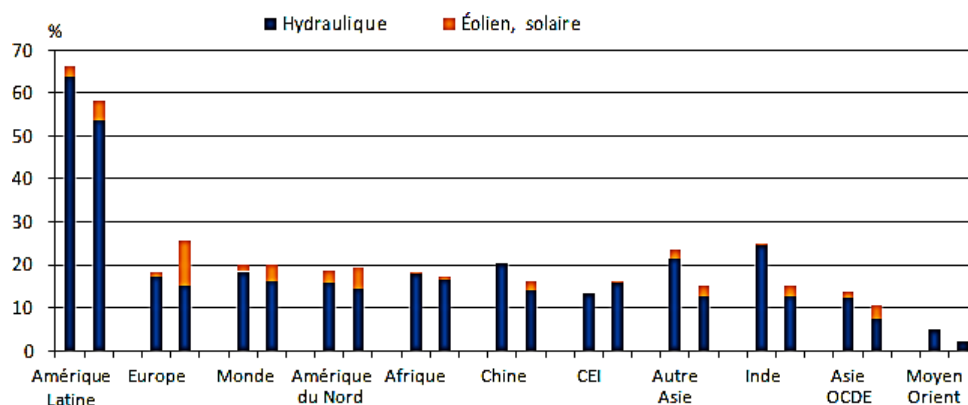


Figure I.22. Part des renouvelables dans la production d'électricité (1990 vs 2011).

Au niveau mondial, le taux de pertes du transport et de la distribution (T&D) d'énergie est resté relativement stable sur la période (9% en 2011), avec des différences importantes selon les régions. L'Amérique latine, la CEI et l'Afrique ont enregistré des pertes accrues (plus de 15%), essentiellement dues à la faible fiabilité des infrastructures de transport et de distribution, à des approvisionnements énergétiques irréguliers, à des factures impayées et à des pertes non techniques (c'est-à-dire les vols dans certains pays).

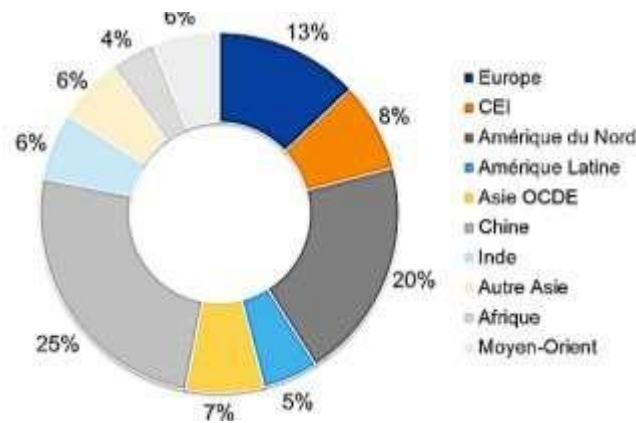


Figure I.23. Répartition des émissions mondiales de CO₂ dues à la consommation d'énergie

I.5.4.3 Emissions mondiales de CO₂ dues à la combustion d'énergie

En 2011, l'Amérique du Nord, l'Europe, la CEI, l'Asie & Pacifique OCDE ont contribué pour un peu moins de la moitié aux émissions mondiales de CO₂ dues à la combustion d'énergie alors qu'ils ne représentent qu'un cinquième de la population. Cependant, leur part diminue rapidement, passant de près de trois quarts des émissions totales en 1990 à 65% en 2000 et 48% en 2011. Depuis 2008, la Chine est devenue le plus grand émetteur de gaz à effet de serre, dépassant les États-Unis. Aujourd'hui, la Chine représente 25% des émissions totales mondiales de CO₂ contre 11% en 1990. Outre la Chine, les cinq premiers pays émetteurs d'émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie sont les États-Unis, l'Inde, la Russie et le Japon qui représentaient au total 58% des émissions mondiales en 2011. Si on ajoute les émissions cumulées des cinq pays suivants (Allemagne, Corée du Sud, Iran, Canada et Arabie saoudite), on constate que les dix premiers pays ont contribué pour un peu plus des deux tiers aux émissions mondiales de CO₂ en 2011.

Cinquante pays environ enregistrent des émissions de CO₂ par habitant supérieures à la moyenne mondiale de 4,2 tonnes de CO₂ par habitant. Vingt pays environ, dont dix d'Afrique subsaharienne, ont de faibles émissions, inférieures à 1,2 t/hab. Près de 40 pays se situent à plus de 7 t/hab. (la moyenne européenne). Au total, 27 pays affichent des émissions élevées, supérieures à 8,5 t/hab. (moyenne de la CEI), voire pour 14 d'entre eux des émissions très élevées, supérieures à 15 t/hab. ; il s'agit de la plupart des pays dotés d'abondantes ressources énergétiques tels que l'Arabie saoudite, le Canada, les États-Unis et l'Australie ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)).

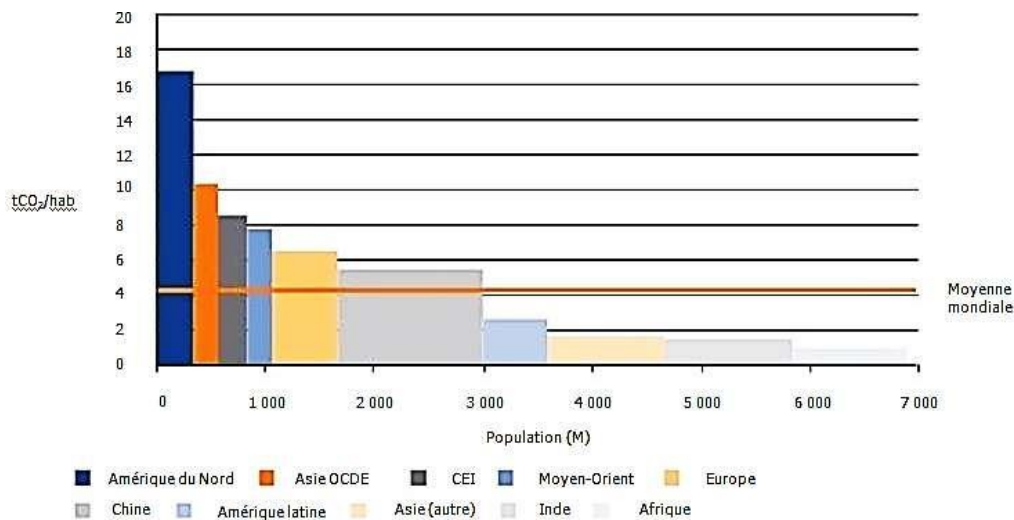


Figure I.24. Émissions de CO₂ par habitant dues à la combustion d'énergie

Au niveau mondial, les émissions de CO₂ par habitant ont augmenté modérément (+10% depuis 1990). On constate même une légère baisse entre 1900 et 2000, suivie d'une augmentation de 14% entre 2000 et 2011, malgré la crise économique qui a eu un impact significatif en 2009 où le taux d'émissions par habitant a reculé de 3%. Ceci est le résultat de deux tendances opposées : une augmentation des émissions de CO₂ par habitant dans la plupart des régions d'une part, et une baisse en Europe, dans la CEI (jusqu'en 1998) et en Amérique du Nord (depuis 2000) d'autre part. L'augmentation la plus importante s'est produite en Chine et en Inde, où les émissions par habitant ont été multipliées respectivement par 3 et 2,5 et au Moyen-Orient (+75%) sous l'effet de la forte croissance économique.

L'intensité d'émission de CO₂ diminue partout dans le monde, sauf au Moyen-Orient. Cette baisse s'explique en grande partie par la réduction de l'intensité énergétique : jusqu'à 80% en Afrique, en Amérique du Nord et au niveau mondial ; et 70% en Europe. La substitution de combustibles explique également cette baisse de l'intensité d'émission de CO₂. En Asie et en Amérique latine, la substitution de combustibles par des combustibles à plus forte teneur en CO₂ (par exemple le charbon) a effacé une partie de la réduction de l'intensité énergétique ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)).

I.5.5 Recommandations pour une réelle politique d'efficacité énergétique

L'amélioration de l'efficacité énergétique fait l'objet d'une cible de l'objectif de développement durable no7 de l'ONU.

Selon le [Conseil mondial de l'énergie](#), il existe bel et bien une tendance de fond en faveur de l'efficacité énergétique depuis les années 1990 après les deux premières crises énergétiques qui ont ébranlé une vision d'une économie énergivore au pétrole sans limites et à bas coûts. Dans le rapport de 2007 consacré à ce thème que le Conseil étudie depuis 1992, ses recommandations confirment :

- L'importance d'un système de « prix incitatifs » ;
- Le « besoin d'un cadre institutionnel » incitatif « stabilisé » ;
- L'intérêt d'une politique concrétisée par un plan d'action national permettant d'adapter cette politique aux spécificités locales, dotée d'un paquet de mesures où les réglementations sont suivies avec attention et la contractualisation PPP encouragée en « visant tous les secteurs où des potentiels d'économie d'énergie existent » ;
- La certification et les tests des équipements et services d'efficacité doivent être renforcés ;
- La coordination internationale, le transfert de savoir-faire s'imposent (par exemple, aux États-Unis, l'International Building Energy Exchange (IBEX7) propose une base de données en ligne 8 sur le thème des technologies de construction, des avancées technologiques et des activités en efficacité énergétique pour le bâtiment).

Dans son rapport, ([Conseil Français de l'Énergie, 2013](#)) met le point en plus sur les recommandations suivantes :

- Les prix de l'énergie devraient refléter les coûts réels et être plus incitatifs pour les consommateurs ;
- Les consommateurs devraient être mieux informés ;
- Facturation et compteurs intelligents ;
- Des outils financement innovants devraient être mis en œuvre à fine de sou-ttenir les investissements des consommateurs ;
- Les réglementations doivent être respectées et régulièrement renforcées ;
- Le comportement devrait bénéficier de la même attention que les technologies – les TIC peuvent apporter leur contribution ;
- Il est nécessaire de surveiller les résultats et les impacts réels des mesures et politiques d'efficacité énergétique ;
- Coopération internationale et régionale renforcée.

I.6 Efficacité énergétique dans le secteur résidentiel

L'efficacité énergétique se réfère à la réduction de la consommation d'énergie sans toutefois provoquer une diminution du niveau de confort ou de qualité de service dans les bâtiments.

Le secteur du bâtiment, dont sa consommation énergétique représente plus de 40% du total de l'énergie, et il est responsable de 20% des émissions mondiales de gaz à effet de serre, se positionne comme un acteur clé pour parvenir à résoudre les inquiétants défis à faire face. Ce Secteur pourrait bien être le seul qui offre des possibilités de progrès suffisamment fortes pour répondre aux engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre ([Lazari, 2019](#)).

Le bâtiment peut être construit pour deux usages distincts : usage tertiaire (tels que commerce, bureaux, enseignement, santé, etc.) et usage résidentiel (bâtiment d'habitation, maison individuelle ou logement collectif) ([Pemaco, 2011](#)).

Cependant, agir efficacement pour réduire de manière sensible la consommation énergétique impose une identification des facteurs de gaspillage, afin de les maîtriser à l'avenir (Lazari, 2019).

De nombreuses études et retours d'expériences ont montré que la diminution des consommations énergétiques des bâtiments passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports solaires passifs, une sur-isolation de l'enveloppe (Lazri, 2019).

Un certain nombre de terme sont utilisés pour désigner les bâtiments présentant une forte efficacité énergétique :

- **Maison passive** : Initiée en 1990 par l'ingénieur Wolfgang Feist, elle est pratiquement autonome pour ses besoins en chauffage. Ces résultats sont atteints grâce à une excellente protection contre l'extérieur, une captation optimale, mais passive de l'énergie solaire et des calories du sol, une limitation des consommations d'énergie des appareils ménagers ;
- **Bâtiment basse énergie** : bâtiment pour lequel la consommation en énergie finale pour le chauffage varie entre 30 et 60 kWh/(m².an) ;
- **Bâtiment très basse énergie** : bâtiment pour lequel la consommation en énergie finale pour le chauffage varie entre 10 et 15 kWh/(m².an) ;
- **Bâtiment à énergie zéro** : Bâtiment qui produit autant d'énergie qu'il en consomme en utilisant des énergies renouvelables (panneaux solaires par exemple). Pour cette notion, on compare souvent l'énergie finale reçue par la maison à l'énergie primaire produite, ce qui n'est pas très correcte.

I.6.1 Besoins énergétiques dans le bâtiment

Le besoin brut du bâtiment est la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir, pendant une période de temps donné, un climat intérieur convenable et satisfaire les prestations du bâtiment (eau chaude, cuisson, éclairage, chauffage, climatisation ...). Elle se caractérise par les différentes formes, c'est pourquoi elle est appelée « protéiforme ».

Dans le bâtiment, le maintien d'un confort thermique agréable semble s'opposer aux recherches d'économie d'énergie. D'où, on ne pourra répondre à cette apparente contradiction que par une conception "globaliste" du bâtiment. Pour ce faire, il faut posséder de bonnes notions sur les paramètres climatiques, l'inertie thermique des bâtiments et leur localisation.

Cette approche du besoin d'énergie de chauffage et de climatisation renvoie trois facteurs explicatifs (Chatrand et Lappilonne, 1977).

- Le besoin en température ; est un besoin de climat intérieur, caractérisé par la température intérieure moyenne (qui explique principalement de façon quantitative le

besoin d'énergie de chauffage ou climatisation) ce besoin en température est, un besoin « social » ;

- Les caractéristiques physiques du logement qui interviennent de façon prépondérante dans la création du besoin d'énergie sont le volume et le degré d'isolation. D'autres caractéristiques importantes telles que l'exposition au soleil, au vent, le vitrage qu'on doit prendre en considération dès la conception et l'implantation ;
- Le climat du site, qui détermine la période du besoin.

Le besoin d'énergie se traduit par la demande d'énergie finale, par exemple les besoins de chaleur pour le chauffage d'une maison donnent naissance à une demande d'électricité, du fuel-oil ou de gaz cette demande est schématisée dans la Figure I.25.

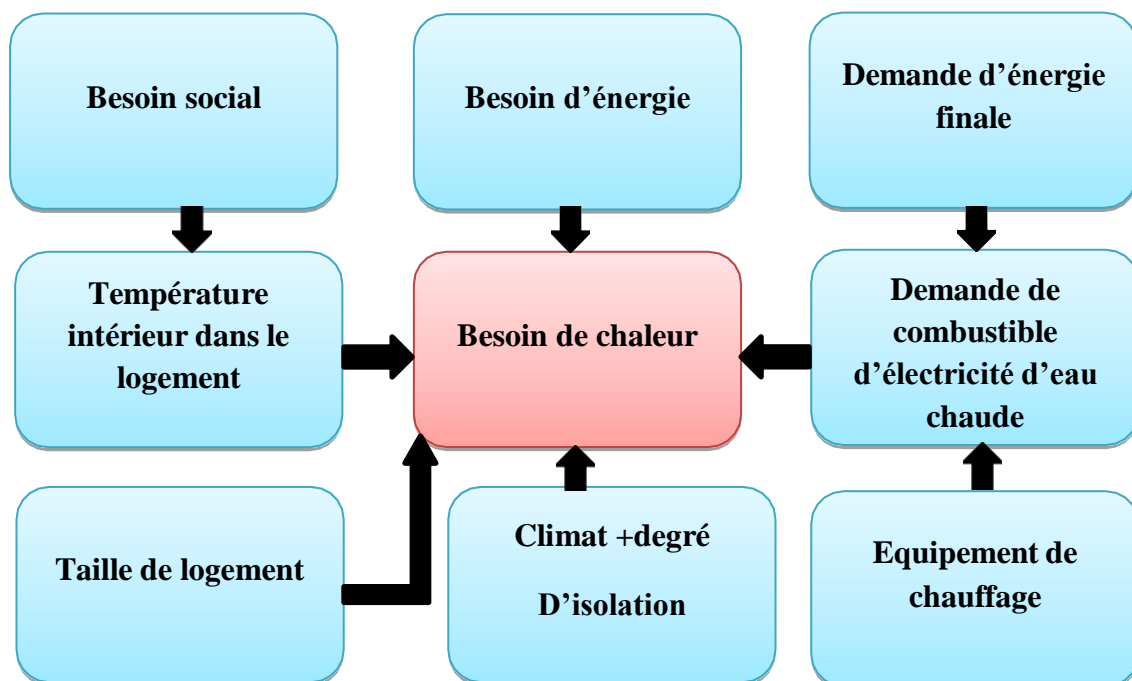


Figure I.26. Besoins d'énergies dans le cas du chauffage domestique

I.6.2 Pourquoi s'intéresser à l'efficacité énergétique des bâtiments ?

Considéré comme les des plus grands consommateurs d'énergies dans le monde, le secteur du bâtiment est désormais observé de près. Les constructions (habitations, bureaux, locaux commerciaux...) consomment une grande part de la production d'énergie, 40 % selon les estimations de l'Union européenne. Les experts, scientifiques et autres observateurs ont réalisé qu'une grande partie de l'énergie produite servant à alimenter les bâtiments est en réalité gaspillée. Il a ainsi été constaté que l'efficacité énergétique des bâtiments pouvait être considérablement améliorée.

C'est de là que sont nées certaines lois et normes entourant la construction et les équipements des bâtiments. Visant à réduire le rapport entre l'énergie qu'utilise une construction et celle qu'elle consomme réellement, ces nouvelles règles ont pour but d'améliorer l'efficacité énergétique de chaque bâtiment.

Toutes ces observations et ces nouvelles réglementations s'appuient sur la volonté des gouvernements de réduire les gaz à effet de serre. Pour ce faire, il faut diminuer la production d'électricité, ou du moins tenter de la stabiliser dans les années à venir.

Plus efficaces, n'utilisant que l'électricité dont ils ont besoin pour fonctionner, les bâtiments de demain seront plus écologiques et plus économes en énergie. Les efforts ont déjà commencé. Cela passe bien entendu par la construction de maisons basse consommation, de bâtiments à énergie passive ou encore d'habitations à énergie positive.

1.6.3 Pourquoi améliorer l'efficacité énergétique ?

Une fois l'efficacité énergétique des bâtiments améliorée, la production d'énergie totale pourra enfin diminuer. Ceci a plus d'un intérêt :

Le premier enjeu est économique. En améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments, on peut envisager de faire d'importantes économies d'énergie. Immédiatement, ces économies d'énergie vont se répercuter sur l'environnement, avec une réduction des gaz à effet de serre.

S'ensuit bien entendu une réduction des coûts énergétiques, avec des économies réelles, qui permettront notamment de développer les différents types de production d'énergie renouvelable.

L'efficacité énergétique des bâtiments concerne chaque personne. À grande ou à petite échelle, il est possible d'agir et d'améliorer les choses. Toutefois, il est important de préciser que l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un bâtiment ne doit pas impacter négativement le confort des occupants ([TotalEnergies, 2020](#)).

1.6.4 Comment améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment

Pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments on distingue deux types de solution ([CoExpert, 2018](#)).

1.6.4.1 Solutions dites « passives »

Leur objectif est de diminuer la **consommation énergétique** des équipements et des matériaux. Elles concernent essentiellement l'architecture et l'équipement du bâti, pour lequel l'efficacité consiste d'abord à ne pas subir les variations extérieures de façon exagérée (déperditions ou apports thermiques).

De nombreux paramètres doivent être pris en compte avant de construire un bâtiment comme son orientation, qui détermine son exposition à l'énergie solaire, son isolation thermique, son étanchéité et son système de ventilation.

On peut aussi agir sur les équipements du bâtiment comme le chauffage, par l'installation de systèmes plus performants et moins émetteurs de gaz à effet de serre :

- Chaudières à condensation et basse température ;

- Systèmes de chauffage à base d'énergie renouvelable ;
- Pompes à chaleur ;
- Chaudières à cogénération, qui ont l'avantage de produire à la fois de l'énergie électrique et thermique.

1.6.4.2 Solutions dites « actives »

Elles visent à optimiser les flux et les ressources. Elles se présentent sous la forme de **systèmes technologiques « intelligents »** qui mesurent, contrôlent et régulent les échanges d'énergie pour éviter les consommations inutiles. Il peut s'agir par exemple de **systèmes de régulation et de gestion** :

- Thermostat d'ambiance – éventuellement programmable – dans l'individuel ;
- Systèmes complexes de gestion technique du bâtiment (GTB) ;
- Affichage en temps réel des consommations ;
- Système de comptage / mesure des consommations, etc.

1.6.5 Rôle des énergies renouvelables dans la maîtrise de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel

Les utilisations des énergies renouvelables dans le bâtiment sont distinctes en fonction des familles de ces énergies : le solaire, l'éolien et la géothermie.

1.6.5.1 L'énergie du soleil

Les bâtiments peuvent être conçus pour tirer profit de l'action de chauffage et d'éclairage du soleil de manière à réduire la consommation d'énergie. Les techniques "passives" visent ainsi à exploiter l'énergie solaire au moyen de grandes fenêtres, placés côtés sud dans les régions nordiques, et des murs qui stockent la chaleur.

L'énergie solaire est beaucoup utilisée pour chauffer l'eau, surtout dans les régions méditerranéennes. Un chauffe-eau solaire consiste en un panneau à travers lequel l'eau se réchauffe en circulant. Un tel système peut fournir de l'eau chaude sanitaire ou alimenter un circuit de chauffage central. À plus grande échelle, le solaire thermique a été mis en œuvre dans des réseaux de chauffage urbain ([Connaissance des énergies, 2014](#)).

A. Le Solaire Photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque utilise également le rayonnement solaire, mais le transforme directement en électricité. La lumière du soleil peut directement être transformée en électricité par des panneaux photovoltaïques (Figure I.27) ([Connaissance des énergies, 2014](#)).

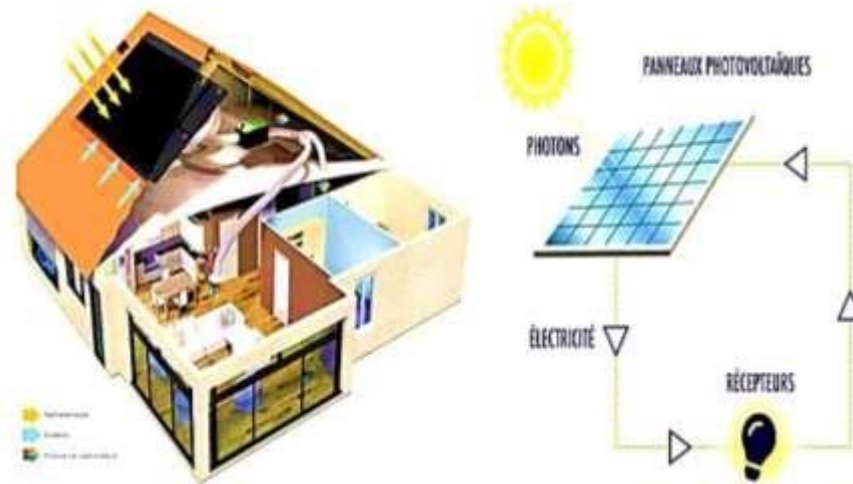


Figure I.27. Exemple d'utilisation de l'énergie solaire Photovoltaïque dans le bâtiment

B. Le Solaire Thermique

L'énergie solaire thermique consiste à capter le rayonnement solaire pour élever la température d'un objet. L'emploi de l'énergie solaire thermique s'effectue directement pour chauffer de l'eau sanitaire par exemple, avec un chauffe-eau solaire, ou encore des fours solaires (Figure I.28). Les applications les plus répandues sont celles concernant le bâtiment comme la production d'eau chaude sanitaire. La conversion du rayonnement solaire en chaleur se fait grâce au capteur solaire thermique ([Connaissance des énergies, 2014](#)).

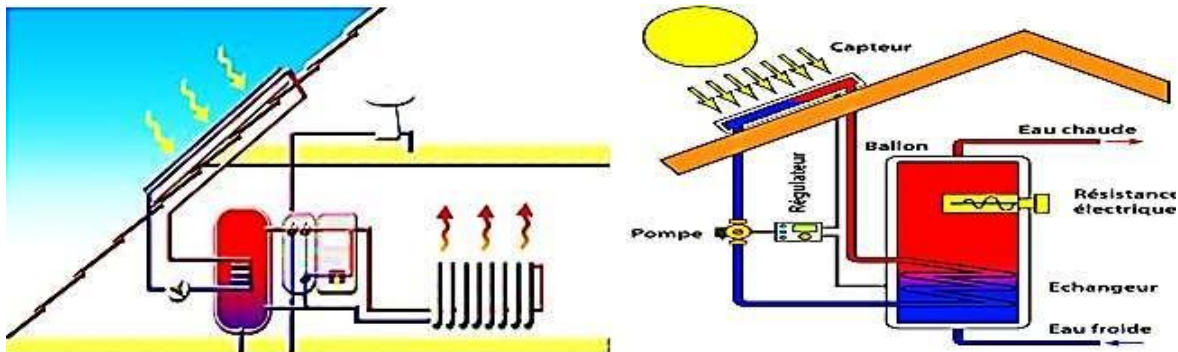


Figure I.28. Solaire thermique

1.6.5.2 L'énergie du vent (l'éolien)

Le principe de l'énergie éolienne est d'utilisation de l'énergie mécanique produite par les mouvements des différentes masses d'air et vent. Cette énergie transforme l'énergie mécanique en électricité, ou autres énergies. Des champs d'éoliennes fonctionnant comme une petite centrale (Figure I.29). Ils produisent de l'électricité qui sera consommée sur place ([Connaissance des énergies, 2014](#)).



Figure I.29. Production d'électricité dans le bâtiment par énergie du vent

I.6.5.3 L'énergie de la terre (la géothermie)

Le principe de La géothermie est d'utiliser la chaleur naturelle provenant des nappes aquifères présentes dans le sol pour fournir un système durable de chauffage pour les bâtiments (Figure I.30) Si cette énergie géothermique peut être à l'origine de chaleur, elle permet également de produire de l'électricité, moyennant l'utilisation de turbines ([Connaissance des énergies, 2014](#)).



Figure I.30. Schéma d'une installation-type de géothermie

I.6.6 Emissions de CO₂ liés à la consommation d'énergie dans secteur des bâtiments

Bien qu'en 2019, dans le monde, la consommation énergétique finale du secteur des bâtiments se soit maintenue au même niveau que l'année précédente, les émissions de CO₂ liées à l'utilisation des bâtiments ont augmenté pour se porter à leur niveau le plus élevé jusqu'ici : près de 10 Gt de CO₂, soit 28 % du total des émissions mondiales relatives à l'énergie. Lorsqu'on y ajoute les émissions du secteur de la construction de bâtiments, ce pourcentage passe à 38 %, contre 39 % en 2018. Cette légère baisse s'explique par l'augmentation des émissions liées aux transports et aux autres secteurs par rapport à celles liées aux bâtiments ([Source : Rapport sur la situation mondiale des bâtiments et de la construction, 2020](#)).

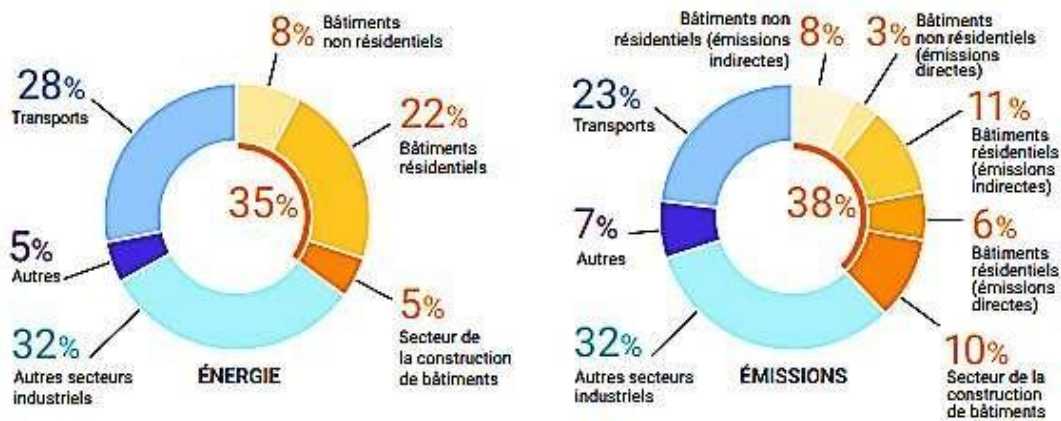


Figure I.31. Part mondiale des bâtiments et de la construction dans la consommation finale d'énergie et les émissions (Source : Rapport sur la situation mondiale des bâtiments et de la construction, 2020)

L'augmentation des émissions de CO₂ enregistrée pour le secteur des bâtiments est due à l'utilisation continue du charbon, du pétrole et du gaz naturel pour le chauffage et la cuisine, conjuguée à un niveau d'activité accrus dans des régions où l'électricité conserve une forte intensité de carbone, ce qui retransmet par un niveau stable des émissions directes mais une hausse des émissions indirectes (c'est-à-dire l'électricité). La consommation d'électricité liée à l'utilisation des bâtiments représente près de 55 % de la consommation mondiale d'électricité (AIE 2020a ; AIE 2020b).

I.7 Méthodes multicritères d'aide à la décision – un outil fiable pour l'évaluation de l'efficacité énergétique des bâtiments

I.7.1 Contexte général

L'aide à la décision vise à résoudre les problèmes très confus dans l'esprit de celui qui se les pose. Cette personne s'appelle souvent un « décideur ». Autrement dit Elle consiste à assister les décideurs et les aider à mieux exprimer leurs choix et préférence vis-à-vis une situation donnée (LIO, 2021).



Figure I.32. Schéma illustratif de l'aide à la décision

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

I.7.2 Définition

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

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

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

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

I.7.3 Terminologies

La présentation et la compréhension des méthodes d'analyse multicritère nécessitent quelques définitions préalables (Michel, 2014).

- **Acteur (d'un processus de décision)** : Individu ou groupe d'individus influençant directement ou indirectement la décision ;
- **Action** : Politique, programme, ou candidat faisant l'objet de l'analyse multicritère ;
- **Critère** : Expression qualitative ou quantitative de points de vue, objectifs, aptitudes ou contraintes relatives au contexte réel permettant de juger des actions potentielles. Afin qu'une telle expression puisse devenir un critère elle doit être utile pour le problème considéré et fiable.
Un critère est doté d'une structure de préférence : à chaque critère est associée une échelle en valeurs ordinales ou cardinales ;
- **Décision** : Options arrêtées lors du processus de décision. Choix final du décideur ;
- **Évaluation** : Détermination de la valeur de la performance d'une action sur un critère, pourvue ou non d'une unité de mesure.
L'intérêt des méthodes d'aide à la décision est justifié dans le cas où la recherche de la solution n'est pas immédiate.

I.7.4 Méthodes multicritères d'aide à la décision (MMAD)

Les méthodes d'aide à la décision multicritères (MMAD) furent introduites dans les années 1970 en réponse à un besoin d'aide dans la prise de décision complexe. Plusieurs écoles ont émergé dans le domaine et elles pourraient se diviser en deux groupes (Pohekar et Ramachandran, 2004) :

- 1) Les méthodes d'aide à la décision multi-objectifs (MODM) et,
- 2) Les méthodes d'aide à la décision multi-attributs (MADM).

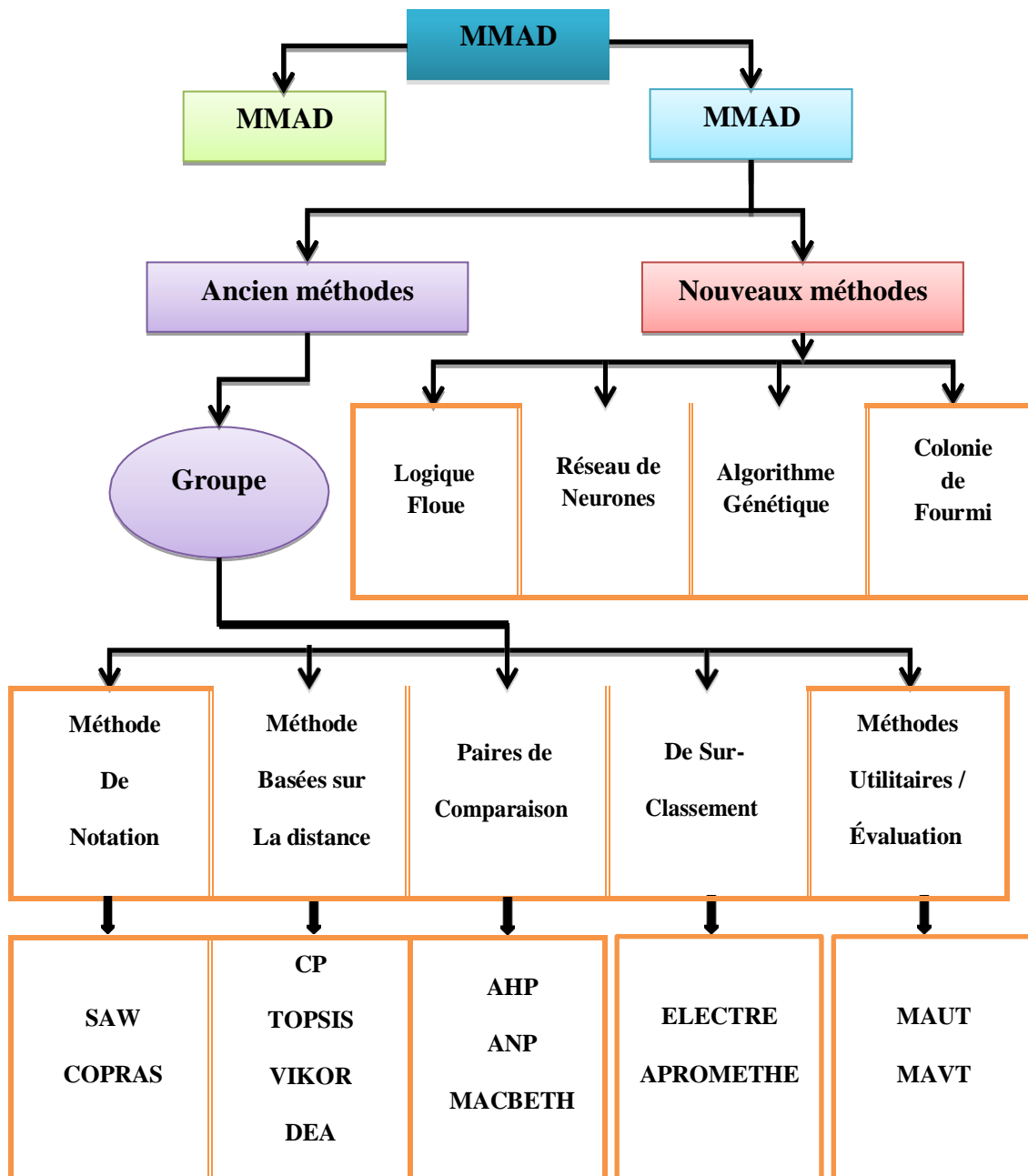


Figure I.33. Méthodes multicritères d'aide à la décision

Chacune de ces catégories regroupent plusieurs types de méthodologies qui ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients en fonction du domaine d'application. Les points communs entre toutes ces méthodes sont qu'elles présentent des critères en conflit, des unités incomparables et de la difficulté dans le choix des alternatives (Yan, 2018).

Dans le cas des MODM, le nombre d'alternatives envisagées n'est pas fini et le but est d'optimiser la liste d'objectifs en une série de contraintes. L'alternative la plus qualifiée par rapport à ces contraintes est retenue. À l'inverse, en utilisant la méthode MADM, un petit nombre d'alternatives est sélectionné et discuté. La présente problématique comporte un nombre fini d'alternatives, la méthode employée fait donc partie des MADM (Yan, 2018).

1.7.5 Méthodes d'aide à la décision les plus utilisés dans la littérature

D'après (Yan, 2018) les MMAD plus utilisées dans la littérature sont : La somme pondérée, le produit pondéré, ELECTRE, TOPSIS, MAUT, PROMETHEE, VIKOR, et enfin AHP.

1.7.5.1 Simple additive weighting (SAW)

La méthode SAW est souvent aussi connue sous le nom de méthode de la somme pondérée. Le concept de base de la méthode SAW consiste à trouver la somme pondérée des notes de performance de chaque alternative sur tous les attributs (Sahir, 2017).

La pondération additive simple (SAW), également connue sous le nom de combinaison linéaire pondérée ou de méthode de notation, est une technique de décision multi-attributs simple et très souvent utilisée. La méthode est basée sur la moyenne pondérée. Un score d'évaluation est calculé pour chaque alternative en multipliant la valeur graduée donnée à l'alternative de cet attribut avec les poids d'importance relative directement attribués par le décideur, puis en additionnant les produits pour tous les critères. L'avantage de cette méthode est qu'il s'agit d'une transformation linéaire proportionnelle de la valeur brute ce qui signifie que l'ordre de grandeur relatif des scores standardisés reste égal (Alireza et al., 2010).

1.7.5.2 Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP)

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

Cette méthode tient son avantage de sa similitude au raisonnement de l'être humain, notamment la décomposition, le jugement et la synthèse. Elle se différencie par sa capacité à gérer différentes classes de critères qualitatifs et quantitatifs (Agrebi, 2018).

1.7.5.3 Technique pour l'Ordre de Préférence par Similarité de Solution Idéale (TOPSIS)

La méthode TOPSIS est proposée par Yoon et Hwang (1981). L'objectif de cette méthode est de choisir une alternative, parmi un ensemble d'alternatives, qui a d'une part, la plus courte distance à l'alternative idéale (la meilleure alternative sur tous les critères), et, d'autre part, qui a la plus grande distance à l'alternative négative idéale (celle qui dégrade tous les critères). Pour cela, la méthode TOPSIS vise, dans un premier temps, à réduire le nombre de scénarios de désambiguïsation en écartant les scénarios dominés et, en deuxième temps, à classer les scénarios efficaces selon leurs scores globaux calculés (Agrebi, 2018).

1.7.5.4 Les méthodes de Préférence Ranking Organisation (Method for Enrichment Evaluations) (PROMETHEE)

Les méthodes PROMETHEE développées par (Brans et al., 1986) sont des méthodes d'analyse multicritère de sur classement, Nous présentons dans cette partie les différentes méthodes de la famille PROMETHEE : PROMETHEE I et II, III et VI (Mareschal et al., 1984 ; Brans et Vincke, 1985 ; Brans et al. 1986).

- **PROMETHEE I** : La méthode PROMETHEE I vise à utiliser une relation de surclassement afin de construire un préordre partiel des alternatives. L'objectif est de trouver une solution au problème du choix ($P\alpha$). Cette méthode n'assure pas forcément le classement de toutes les alternatives. Par conséquent, certaines alternatives peuvent rester incomparables. Cela peut être très utile pour la prise de décision du point de vue préordre partiel qui peut contenir plus d'informations. PROMETHEE I s'applique au cas où les critères sont des pseudo-critères et repose exclusivement sur une analyse de concordance.
- **PROMETHEE II** : La méthode PROMETHEE II a comme but la résolution du problème du choix ($P\alpha$) et le problème de rangement ($P\gamma$). Contrairement à la méthode PROMETHEE I, elle consiste à construire un préordre complet des alternatives. En effet, l'utilisation de ce préordre complet est considérée plus simple par le décideur sollicité pour apporter une réponse au problème de décision.
- **PROMETHEE III** : La méthode PROMETHEE III est une extension de PROMETHEE II. Elle vise à amplifier la notion d'indifférence, due au préordre complet des alternatives, existant dans PROMETHEE II.
- **PROMETHEE IV** : Cette méthode étend aussi la méthode PROMETHEE II. Elle répond au problème du choix ($P\alpha$) dans le cas d'un ensemble infini d'alternatives. Ces alternatives peuvent être par exemple des dimensions d'un produit, des compositions d'un alliage et des investissements, etc.

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.

1.7.5.5 Elimination and choice expressing reality (ELECTRE)

Les méthodes d'analyse multicritère ont été développées suite aux besoins qui se sont fait sentir dans le domaine de l'aide à la décision. Les projets de grande envergure, en effet, nécessitent des choix qui font bien souvent intervenir des critères peu compatibles. Pour résoudre ce genre de problème, il faut donc faire appel à des méthodes de formalisation qui permettent d'effectuer des classements entre les diverses décisions, c'est le but des méthodes ELECTRE (ÉliminationEt choix Traduisant réalité) qui ont été mises au point par Roy qui est une famille de méthodes d'analyse multicritères développée en Europe à la fin des années 1960 les versions de cette méthode sont : ELECTRE II (Roy et Bertier, 1971), ELECTRE III (Roy, 1978), ELECTRE IV (Hugonnard et Roy, 1982), ELECTRE IS (Roy et Skalka, 1984), ELECTRE A (non publié pourraisons confidentielles). Ces méthodes se servent :

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

1.7.5.6 Multi-attribute utility theory (MAUT)

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

La procédure, basée sur un principe de régression ordinale, consiste à résoudre un programme linéaire. L'utilisateur peut modifier d'une façon interactive les fonctions d'utilité dans les limites fournies par une analyse de sensibilité du problème de régression ordinale. Pour effectuer ces modifications, l'utilisateur est aidé par une interface graphique très conviviale. La fonction d'utilité acceptée par l'utilisateur sert alors à définir un pré ordre sur l'ensemble des actions.

1.7.5.7 Multicriteria optimization and compromise solution (VIKOR)

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

1.7.6 Domaines d'applications des MMAD

De nombreuses méthodes de MMAD ont été créées et utilisées au cours des dernières décennies. Velasquez et Hester (2013) ont résumés les avantages et les atouts observés, ainsi que les domaines d'application de chaque méthode (Tableau I.1).

Tableau I.1. Domaines d'applications, avantages et inconvénients de MMAD

Méthode	Avantage	Inconvénient	Domaines d'applications
Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP)	Facile à utiliser ; évolutif ; la structure hiérarchique peut facilement s'adapter à des problèmes de toutes tailles ; ne nécessite pas de données importantes. intensive de données	Problèmes dus à l'interdépendance entre les critères et les alternatives ; peut conduire à des incohérences entre le jugement et les critères de classement ; inversion du classement	Problèmes de type performance, gestion des ressources, politique et stratégie d'entreprise, politique publique, stratégie politique et planification
ELECTRE	Tient compte de l'incertitude et de l'imprécision	Son processus et son résultat peuvent être difficiles à expliquer en termes simples ; le surclassèrent fait que les forces et les faiblesses des alternatives ne sont pas directement identifiées	Problèmes d'énergie, d'économie, d'environnement, de gestion de l'eau et de transport
PROMETHEE	Facile à utiliser ; ne nécessite pas de supposer que les critères sont proportionnés	Ne fournit pas une méthode claire d'attribution des pondérations	Environnement, hydrologie, gestion de l'eau, affaires et finances, chimie, logistique et transport, fabrication et assemblage, énergie, agriculture
Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale (TOPSIS)	A un processus simple ; facile à utiliser et à programmer ; le nombre d'étapes reste le même quel que soit le nombre d'attributs	L'utilisation de la distance euclidienne ne tient pas compte de la corrélation des attributs ; il est difficile de pondérer et de maintenir la cohérence du jugement	Gestion de la chaîne d'approvisionnement et logistique, ingénierie, systèmes de fabrication, commerce et marketing, environnement, ressources humaines, gestion des ressources en eau
Simple additive weighting (SAW)	Capacité de compenser entre les critères ; intuitif pour les décideurs ; le calcul est simple et 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	La gestion de l'eau, les affaires et la gestion financière
Goal Programming (GP)	Capable de traiter des problèmes à grande échelle ; peut produire des alternatives infinies	Sa capacité à pondérer les coefficients ; elle doit généralement être utilisée en combinaison avec d'autres méthodes MCDM pour pondérer les coefficients	Planification de la production, ordonnancement, soins de santé, sélection de portefeuilles, systèmes de distribution, planification énergétique, gestion des réservoirs d'eau, ordonnancement, gestion de la faune
Multi-attribut utility théorie (MAUT)	Tient compte de l'incertitude ; peut intégrer des préférences	Nécessite beaucoup de données ; les préférences doivent être précises	Économie, finance, actuariat, gestion de l'eau, gestion de l'énergie, agriculture
Data envelopment analysis (DEA)	Capable de traiter de multiples entrées et sorties ;	Ne traite pas les données imprécises ;	Économie, médecine, services publics, sécurité routière,

	l'efficacité peut être analysée et quantifiée	suppose que toutes les entrées et sorties sont exactement connues	agriculture, commerce de détail et problèmes commerciaux
MACBETH	La méthode MACBETH permet de combiner deux types d'information une information sur les préférences révélées par le décideur, une information sur l'importance des critères et leurs interactions, limitées aux paires de critères	<ul style="list-style-type: none"> •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 	/
MAVT	La méthode MAVT est très pratique pour les problèmes d'aide à la décision, les problèmes d'économie, de finance et d'actuariat.	<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.</p> <ul style="list-style-type: none"> •La construction de la fonction analytique est une tâche ardue. •L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèses très restrictives du point de vue théorique. 	/
CP	Le compromis programming a l'avantage d'avoir une fonction objectif facile à formuler	<ul style="list-style-type: none"> •la résolution du modèle Compromise Programming peut être beaucoup plus difficile dans le cas où on dispose d'un ensemble de contraintes à respecter. •Le défaut du Compromise Programming est de proposer une action médiocre si toutes les actions ne sont pas bonnes. •Le Compromise Programming exige une articulation a-priori des préférences 	/

I.7.7 Application des MMAD dans le domaine de l'évaluation de l'efficacité énergétique des bâtiments d'habitation

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).

De nombreux travaux dans le domaine de l'énergie utilisent des méthodes multicritères car celles-ci permettent de prendre en compte la multiplicité de facteurs dans un contexte changeant. Comme évoqué précédemment, une multitude de méthodes existent et chacune a sa particularité, ses objectifs, ses forces et ses faiblesses. Dans le but de populariser cette approche, certaines études se focalisent sur la comparaison des méthodes et outils associés afin de faciliter le choix d'un chercheur intéressé. Parmi ces travaux, trois de ces études m'ont permis de choisir la méthode la plus adaptée à ma problématique, mes ressources et le contexte de mon projet (Yan, 2018).

Pohekar et Ramachandran (2004) ont effectué une revue de plus de 90 publications qui utilisent les méthodes d'analyse multicritères dans le domaine de la planification énergétique. L'objectif de leur étude était de classer ces publications par méthode utilisée et domaine d'application afin d'évaluer les méthodes les plus utilisées. Les conclusions montrent que l'AHP (Analytical hiérarchique process) est la technique la plus populaire suivie des méthodes de sur classement ELECTRE et PROMETHEE (Yan, 2018).

I.8 Conclusion

Nous avons vu à travers ce chapitre que l'énergie est un produit vital pour toutes les activités humaines. Actuellement, le pétrole, le charbon et le gaz naturel, trois énergies polluantes et Non renouvelables, fournissent la plupart de la consommation quotidienne mondiale d'énergie.

L'efficacité énergétique est devenue au fil des années un des piliers des politiques Énergétiques, et plus récemment des politiques de lutte contre le changement climatique. Quand l'efficacité énergétique s'améliore, l'énergie nécessaire pour faire face aux besoins des gens et aux diverses activités économiques baissent.

Le secteur bâtiments est parmi les secteurs les plus grand consommateurs d'énergie dans le monde, cela est dû à la poursuite constante de l'homme pour améliorer et atteindre les meilleures performances énergétiques et élever le niveau de confort et de luxe dans les bâtiments résidentiels, cette énergie est généralement utilisée usages chauffage et/ou le refroidissement l'éclairage des communications, etc.).

Quand on parle sur la relation d'efficacité énergétique dans les bâtiments d'habitation on trouve que moins un bâtiment consomme d'énergie, plus son efficacité énergétique et donc sa performance énergétique est élevée.

Les méthodes multicritères d'aide à la décision permettent de prendre la décision finale lors de choix de différentes alternatives, et sont des méthodes qui utilisées dans tous les domaines.

Chapitre 02

**Maitrise de l'énergie et
efficacité énergétique du
secteur résidentiel en Algérie
- État des lieux**

II.1 Introduction

L'efficacité énergétique est rapidement devenue l'un des grands enjeux de notre époque et les bâtiments en sont une des composantes majeures. Ils consomment plus d'énergie que tout autre secteur et contribuent donc dans une large mesure au changement climatique. La hausse des températures est une menace potentielle pour les écosystèmes, mais aussi pour les humains affectent directement le comportement thermique des bâtiments, en augmentant la consommation d'énergie pour maintenir le confort thermique de ses utilisateurs. En conséquence, les émissions de gaz à effet de serre découlant de l'utilisation d'énergie par les bâtiments représentent environ 39 % des émissions mondiales en 2017 (Global ABC, 2018). Cette situation inquiétante a obligé les pays du monde entier à mettre en place des projets et politiques publiques renforçant l'efficacité énergétique des bâtiments (Rahmouni, 2020).

L'Algérie ne fait pas l'exception des pays en voie de développement, dont la croissance continue de la population et les zones urbaines et des modèles de constructions étrangères se sont généralisés sur tout le territoire algérien, inappropriée au contexte culturel, social et climatique du pays. En conséquence, le secteur bâtiments a été classé les plus énergivore avec une consommation qui représente environ de 43 % de la consommation finale, c'est ce qui poussait l'Algérie à développer une politique d'amélioration de l'efficacité énergétique, notamment en ce qui concerne le secteur résidentiel (MEA, 2017 ; Rahmouni, 2020).

L'efficacité énergétique est maintenant reconnue comme l'une des approches les plus rapides et les plus appropriées pour réduire les émissions des gaz à effet de serre liées à la consommation d'énergie et rendre la conception des bâtiments développés et durable (Loonen et al., 2016 ; Navid et al., 2018 ; Fatemeh et al., 2017 ; Nima, 2017 ; Koezjakov, 2018 ; Kneifel et O'Rear, 2016 ; Rahmouni, 2020).

II.2 Parc énergétique de Algérie – État des lieux

II.2.1 Réserves des énergies primaires (fossiles)

Un rapport de classification internationale, dirigé par la fondation américaine (Business Inside), a classé l'Algérie à la 18ème place dans le monde, en termes de réserves d'énergies fossiles. Ce rapport, qui a pris en compte l'ensemble des pays qui ont les plus grandes réserves d'énergies produites à partir de combustibles fossiles, qui se compose de pétrole, de gaz et de charbon, a indiqué aussi que l'Algérie occupe le sixième placé dans le monde Arabe, après l'Arabie saoudite, l'Irak, les Émirats arabes unis, le Koweït et la Libye (Saliha, 2014).

La fondation américaine a évalué les réserves de pétrole disponibles dans le sud algérien, à 12,2 milliards de barils et les réserves en gaz à 4,5 mille milliards m³ (Tableau II.1). La Figure II.1 donne aussi un aperçu des bassins sédimentaires de l'Algérie.

Néanmoins, des doutes existent sur la fiabilité des statistiques officielles. Le niveau des réserves de pétrole et de gaz n'a strictement pas changé depuis une quinzaine d'années.

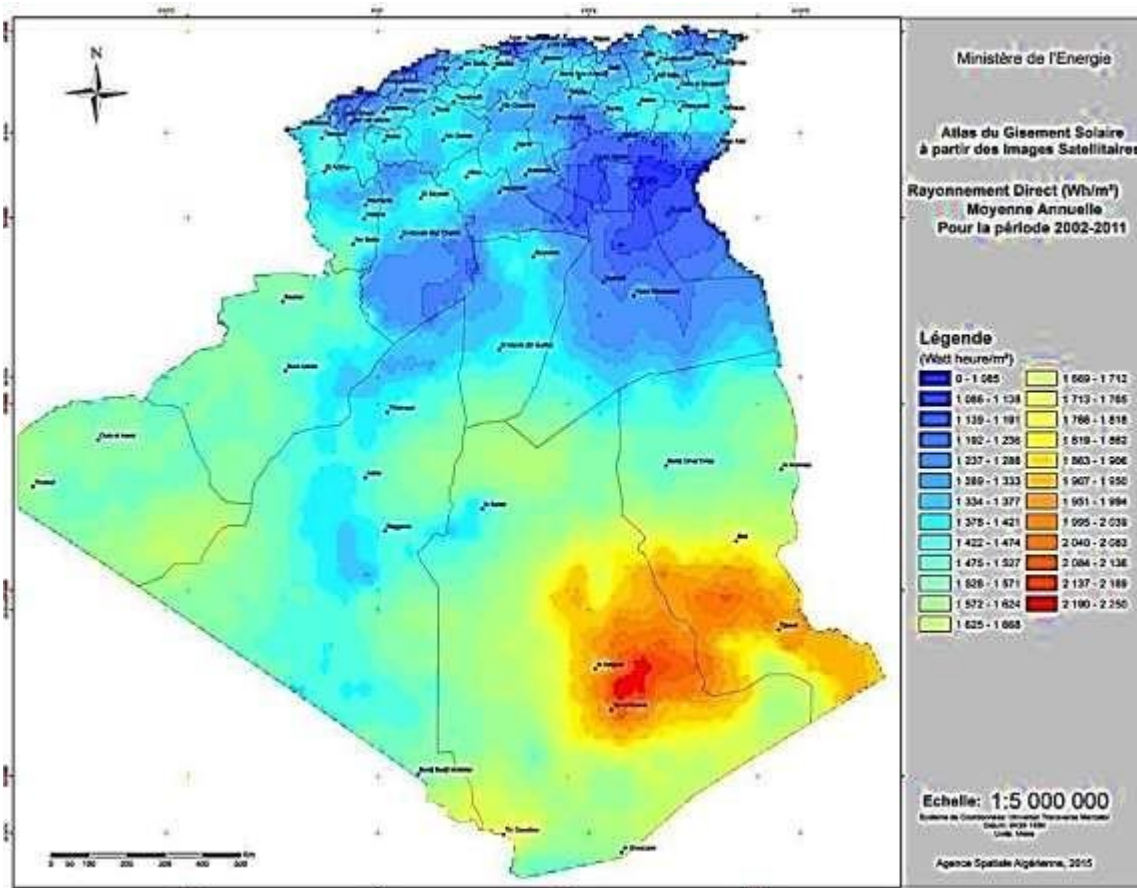


Figure II.2. Carte de l'Irradiation directe annuelle moyenne (MEM, 2021).

II.2.2.2 Energie éolienne

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen qui est caractérisé, par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien (MEM, 2021).

La carte représentée ci-dessous (FigureII.3) montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le sud-est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépasse la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (in Amg Uel). Cela revient à l'absence des obstacles qui empêchent le mouvement de l'air (les montagnes et la couverture végétale). Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée, On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, Msila et El bayadh (6 à 7 m/s) (MEM, 2021).

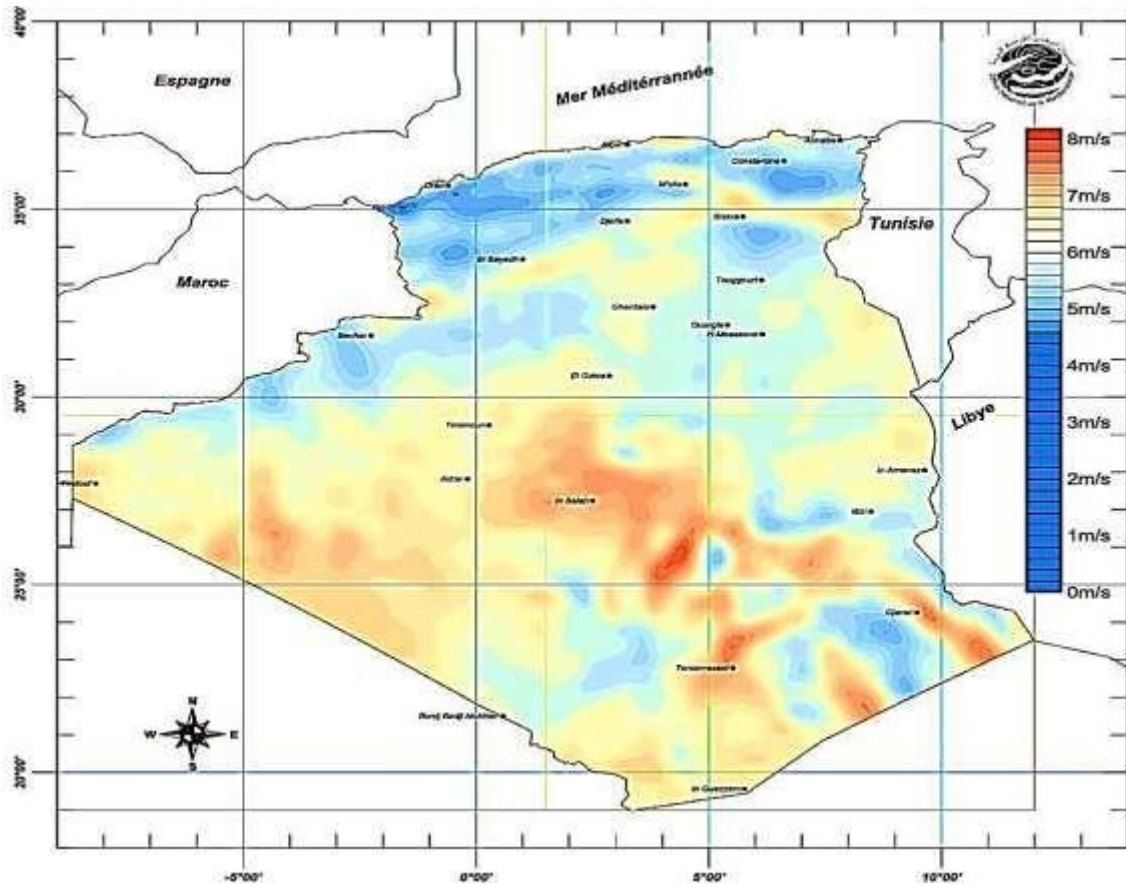


Figure II.3. Carte du vent annuel moyen à 50m (Période 2001-2010) (MEM, 2021)

II.2.2.3 Energie Géothermique

L'Algérie, avec plus de 240 sources thermales, possède un fort potentiel en ressources énergétiques d'origine géothermale. Les principales ressources géothermales sont classées en fonction de la température. La plus renommée de ces ressources est la source thermale de Hammam Debagh (Ex-Hammam Meskhoutine). Elle est classée parmi les sources thermales les plus chaudes au monde, sa température d'eau à l'émergence est de 98°C (Algérie presse service, 2022).

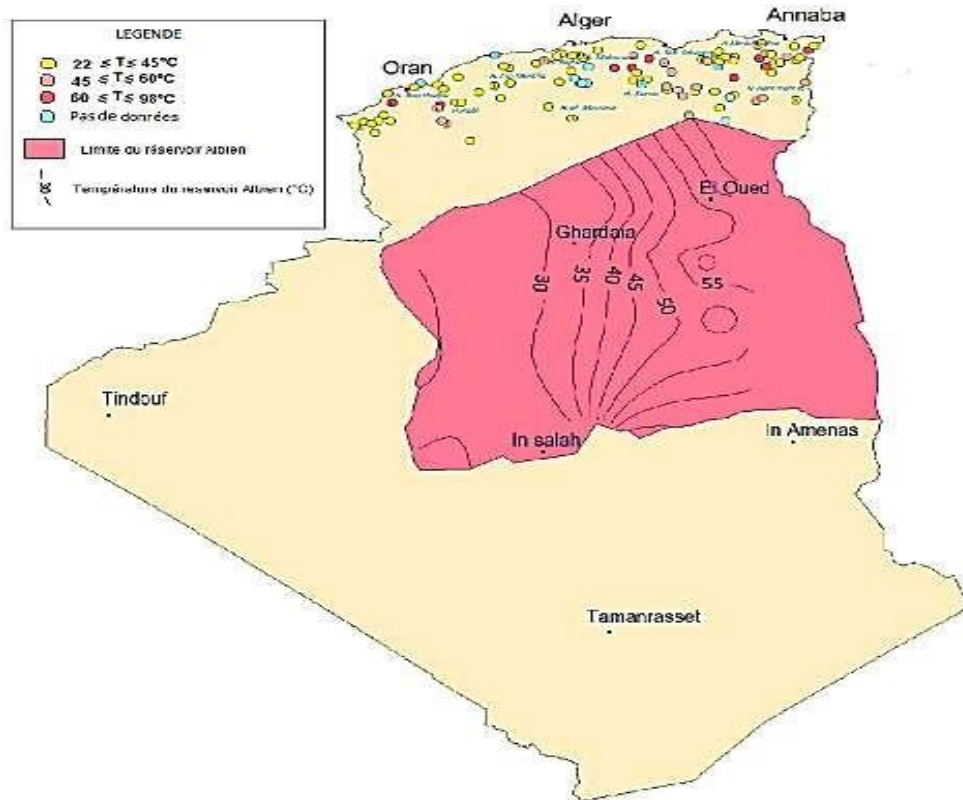


Figure II.4. Cartographie et caractérisation des ressources géothermique de l'Algérie (GmbH, 2022)

II.2.2.4 Energie hydraulique

Les quantités globales de pluie tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

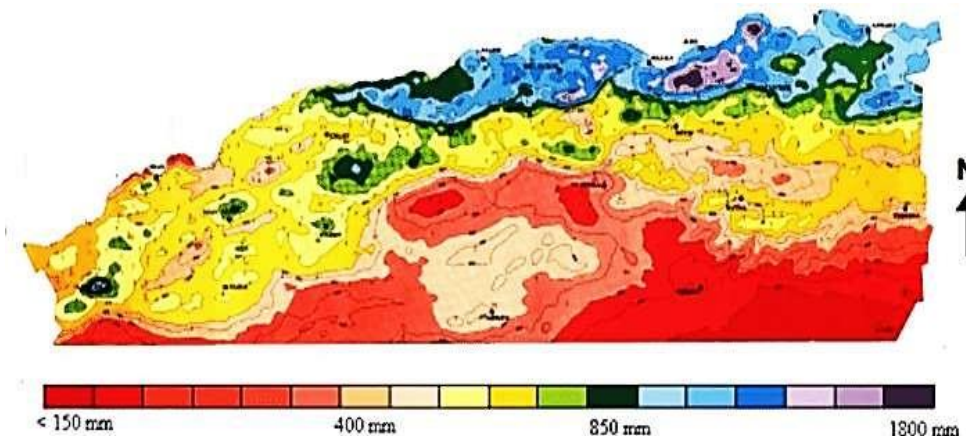


Figure II.5. Carte pluviométrique pour le nord de l'Algérie (GmbH, 2022)

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont

environ 2/3 pour les ressources en surface (MEM, 2021).

L'hydroélectricité est également le troisième fournisseur d'électricité en Algérie après le gaz naturel et le pétrole. Le pays compte 13 centrales hydroélectriques situées dans le nord du pays qui bénéficient de fortes précipitations (ATTAQA, 2022).

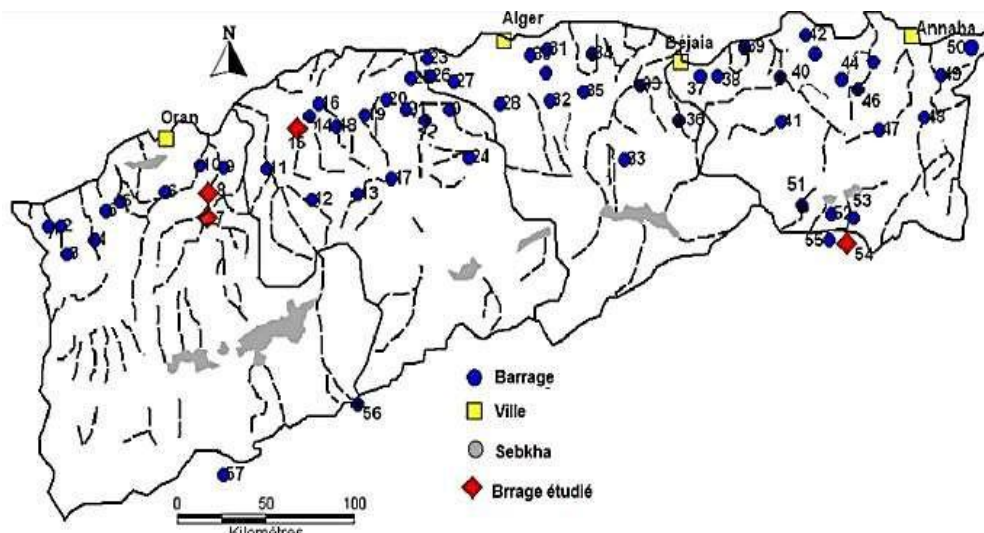


Figure II.6. Localisation des barrages Algériens (GmbH, 2022)

II.2.3 Production des énergies en Algérie

II.2.3.1 Production des énergies primaires

La production commerciale d'énergie primaire a connu une baisse de -4,8 par rapport aux réalisations de 2018, pour atteindre 157,4 M Tep, tirée par celle de tous les produits à l'exception de l'électricité, comme indiquée ci-après (Ministère de l'énergie, 2019).

Tableau II.2. Production commerciale d'énergie primaire

Produit	unités	2018	2019	Evolution	
				quantité	(%)
Gaz naturel	K Tep	92106	85380	-6726	-7.3
	10 ⁶ m ³	97467	90349		
Pétrole brut	K Tep	53592	53579	-216	-0.4
	K tonnes	48588	48394		
condensat	K Tep	9990	9226	-763	-7.6
	K tonnes	8825	8151		
GPL aux champs	K Tep	9343	9186	-157	-1.7
	K tonnes	7918	7785		
Electricité primaire	K Tep	188	192	5	2.4
	GWh	783	835		
Combustible solide (bois)	K Tep	22	10	-12	-53.5
	10 ³ m ³	113	53		
TOTAL	K Tep	165241	157374	-7867	-4.8

Ainsi, la production d'électricité primaire est passée de 783 à 835 GWh en 2019, tirée par une hausse (+30%) de la production de la filière hydraulique à la suite d'une pluviométrie favorable en 2019, où la production totale a été de 152 GWh contre 117 GWh en 2018.

La structure de la production d'énergie primaire commerciale reste dominée par le gaz naturel à hauteur de 54%, comme illustré dans le graphe ci-après (Ministère de l'énergie, 2019).

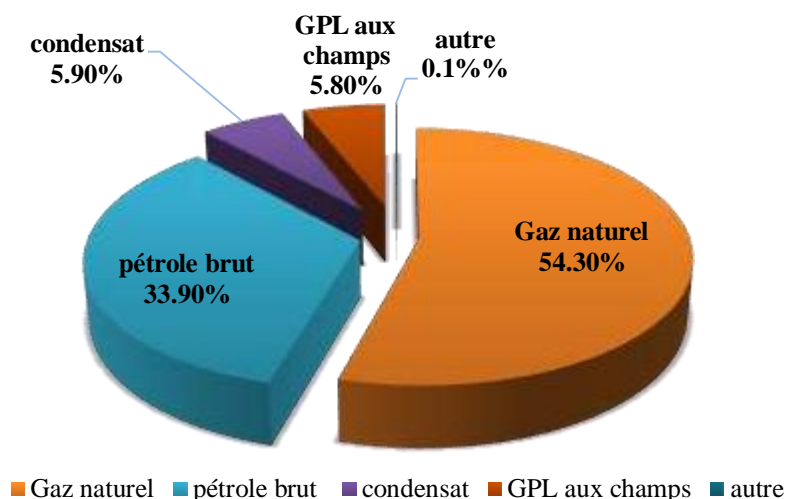


Figure II.7. Structure de la production d'énergie primaire

II.2.3.2 Production d'énergie dérivée

La production d'énergie dérivée a atteint 66,1 M Tep, en hausse (+2,2%) par rapport aux réalisations de 2018, tirée par celle de la production du gaz naturel liquéfié (GNL) (+21,9%) et de l'électricité thermique (+2,1%) (Ministère de l'énergie, 2019).

Tableau II.3. Production des énergies dérivées

Produit	unités	2018	2019	Evolution	
				Quantité	(%)
Produits pétroliers	K Tep	30865	29114	-1751	-5.7
	K tonnes	29337	27689		
Electricité thermique	K Tep	18171	18555	384	2.1
	GWh	75880	80691		
GNL	K Tep	13021	15877	2856	21.9
	10 ⁶ m ³	13779	16801		
GPL (raffineries et unités GNL)	K Tep	1244	1335	91	7.3
	K tonnes	1054	1131		
Autres (GHF charbon de bois) GHF BOIS	K Tep	1380	1207	-174	-12.6
	10 ⁶ m ³	1461	1277		
	10 ⁶ m ³	-	3		
TOTAL	K Tep	64681	66088	1406	2.2

À l'inverse, la production des produits pétroliers a enregistré une baisse (-5,7%) comparativement à la même période de l'année précédente, pour s'établir à 27,7 millions de tonnes, tirée par la baisse (-7,3%) de la charge traitée de pétrole brut au niveau des raffineries après l'arrêt des opérations de processing de pétrole à l'étranger. La structure de la production d'énergie dérivée reste dominée par les produits pétroliers avec 44%, comme illustré ci-dessous (Ministère de l'énergie, 2019).

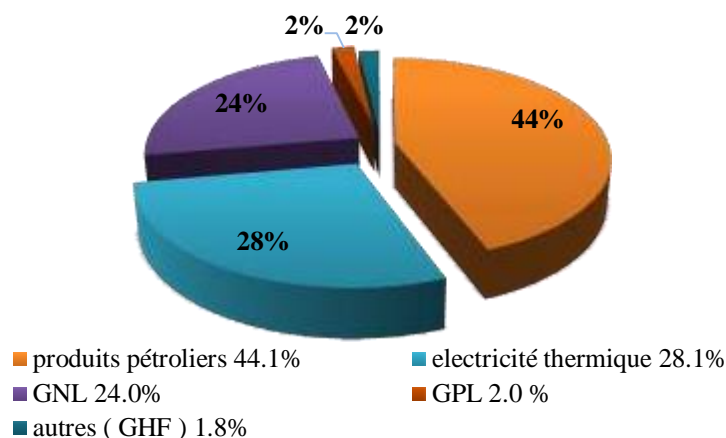


Figure II.8. Structure de la production des énergies dérivées

II.2.3.3 Production des énergies renouvelables

L'Algérie a occupé la troisième place au niveau africain en matière de capacités d'énergies renouvelables installées avec 0,5 Gigawatts (GW) à fin 2020, après l'Afrique du Sud et l'Égypte (Algérie presse service, 2022).

L'Algérie se repose presque exclusivement sur les combustibles fossiles (99,2 %) pour répondre aux besoins croissants d'électricité de sa population. Les énergies renouvelables n'occupent donc qu'une faible part du mix électrique national (0,8 %) et leur production est partagée entre la filière hydraulique qui a généré cette année 389 GWh, soit 0,7 % du total, et les filières solaires photovoltaïque (11 GWh) et thermodynamique (58 GWh) qui représentent quant à elles 0,1 % du bilan (Observ'ER, 2013).

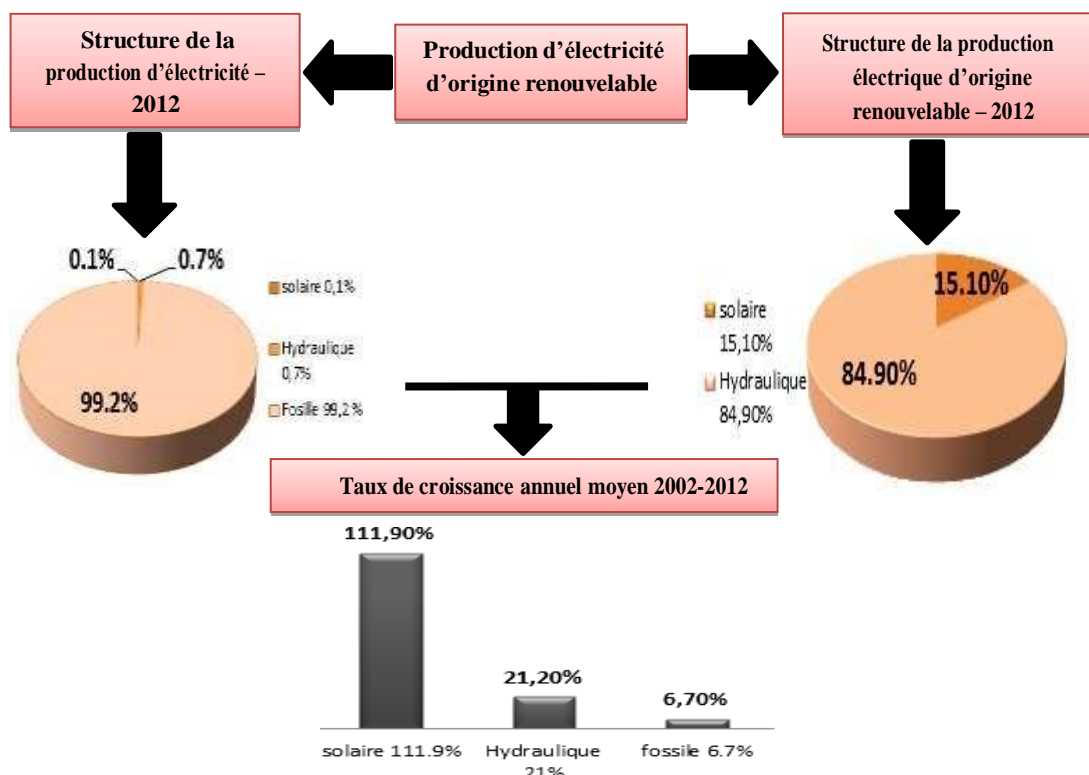


Figure II.9. Structure de La production d'électricité d'origine renouvelable

Les centrales principales de production des énergies d'origine renouvelables en Algérie sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.4. Centrales de la production des énergies renouvelables (MEM, 2021)

Centrale Hybride Solaire-Gaz	<ul style="list-style-type: none"> Localité : Hassi r'mel (Laghouat) Capacité : 150 MW Technologie : Système ISCC (Integrated solar Combined Cycle), 120 MW cycle combiné, 30 MW Solaire Thermique (CSP parabolique) Système HTF (Heat Transfert Fluide) 393°C; Système de poursuite du soleil (Trackeur) ;
Centrale pilote photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> Localité : Oued N'chou (Ghardaïa) Capacité : 1 131 16 WC Technologie: huit sous-champs des quatre technologies (Monocristallin, polycristallin, amorphe et couche mince Cd Te) montées sur des structures fixes et motorisées
Ferme éolienne	<ul style="list-style-type: none"> Localité : Kabertène (ADRAR) Capacité : 10,2 MW Technologie : Gamesa 850 KW (12 x 850 KW)

II.2.4 Gouvernance du parc énergétique en Algérie

L'énergie est le moteur de développement dans tous les secteurs et comme l'Algérie et un pays énergétique par excellence. L'Algérie a cherché à maîtriser et à préserver cette énergie à

travers la création d'instances internes chapoté par le ministère de l'énergie et des mines. D'autres organismes extérieurs contrôle l'énergie comme l'OPEC ainsi que d'autres facteurs tels que l'offre et la demande. La Figure II.14 illustre bien cette idée.

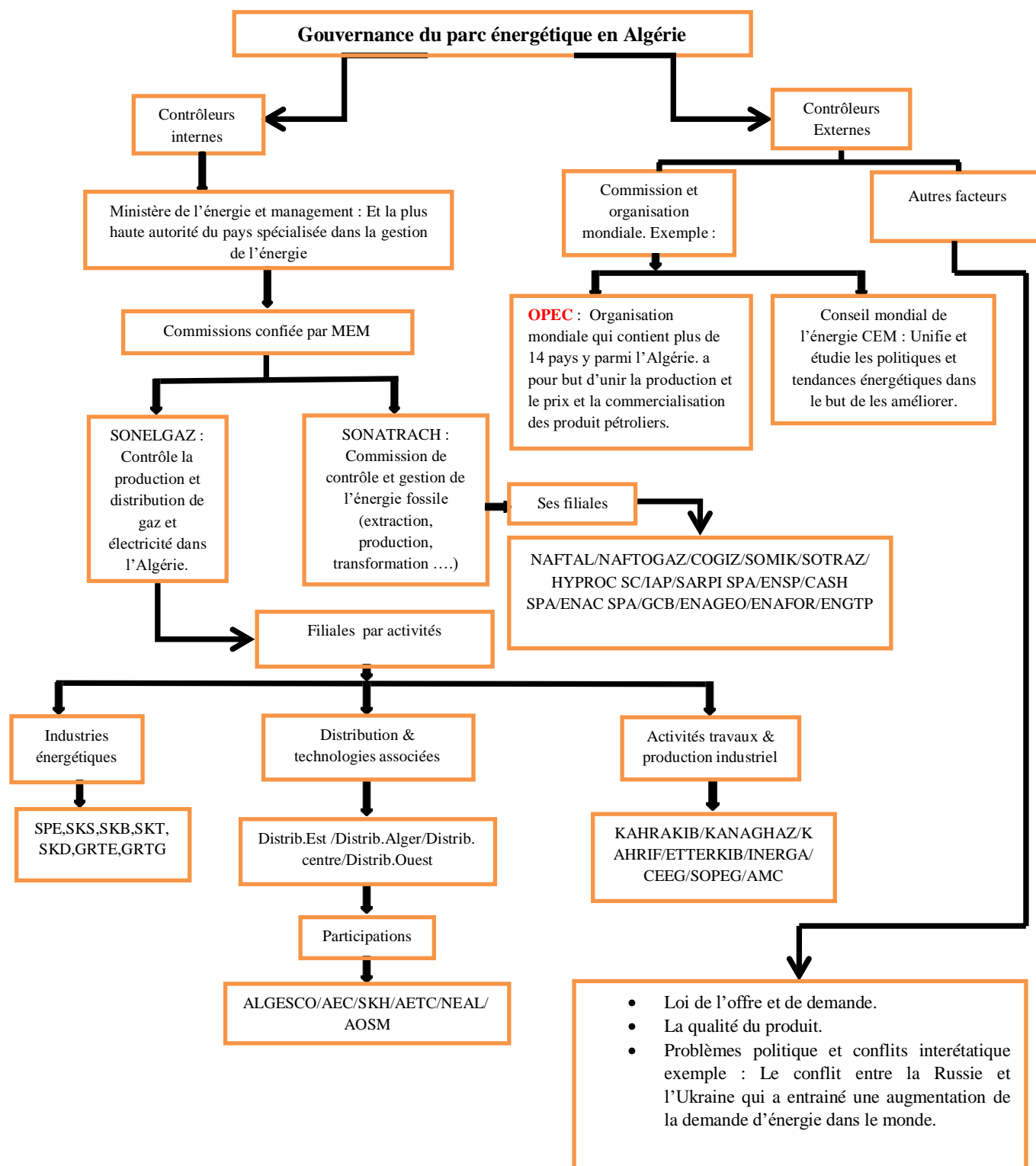


Figure II.10. Organigramme de la gouvernance du parc énergétique en Algérie

II.3 Situation énergétique dans le secteur résidentiel en Algérie

II.3.1 Parc du logement en Algérie

Le ministre de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville, Kamel Beldjoud a annoncé que le parc national du logement comptait 9.600.969 unités recensées à fin 2018. (Algérie presse service, 2019).

L'évolution du parc du logement entre 1999 et 2018 est représenté ci-dessous :

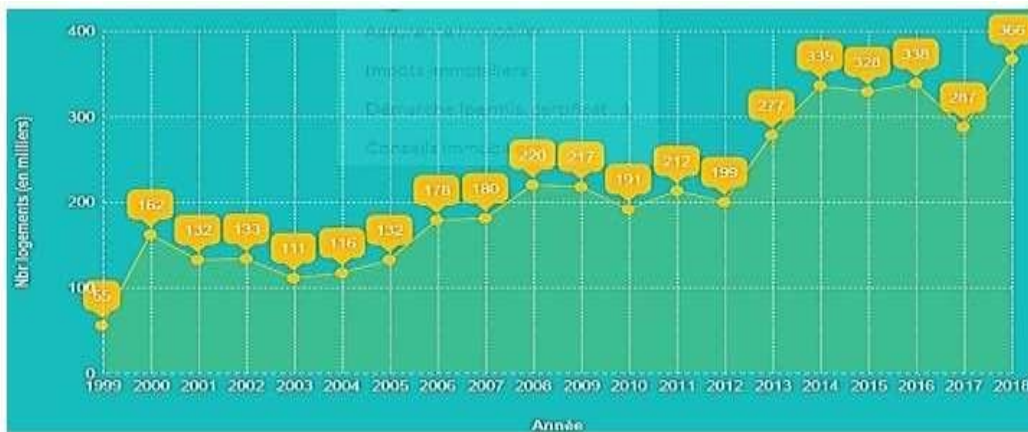


Figure II.11. Nombre des logements réalisés en Algérie (1999-2018) (Lkeria, 2019)

Ce parc compte plusieurs programmes et formule lancé par les autorités public et privés pour répondre à la demande croissante de logements. La Figure II.12 illustre la répartition du parc du résidentiel en fonction des différentes formules de logements.

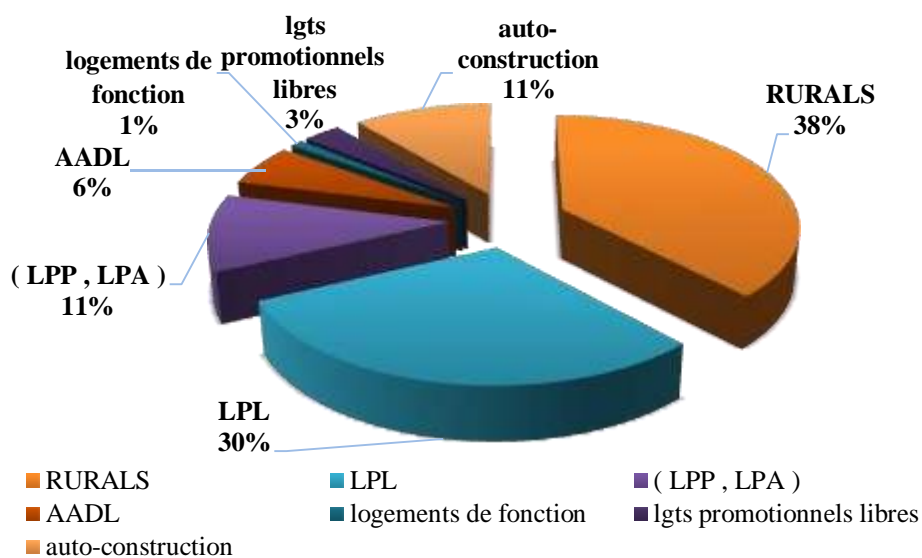


Figure II.12. Structure des logements en fonction de leur type en Algérie (1999-2018) (Algérie presse service, 2018)

II.3.2 Parc du logement à l'horizon 2050

Depuis l'indépendance, l'Algérie a connu une augmentation de sa population (Figure II.13) en particulier dans la première décennie du XXI^e siècle (à cause de la fin du colonialisme et des guerres civiles et de l'amélioration du niveau de vie) et cette augmentation se poursuit toujours, ceci bien sûr conduit à une augmentation de la superficie des zones urbaines.

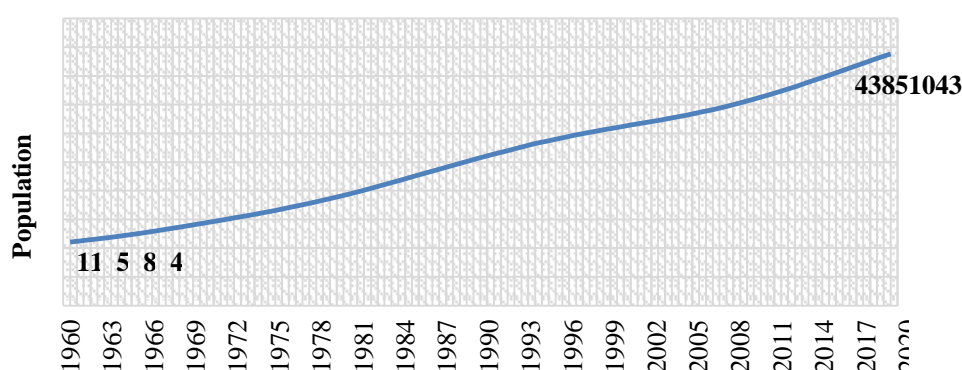


Figure II.13. Évolution de la population totale Algérie (1960-2020) (Perspective monde, 2020)

D'après les travaux de Ouahab (2015), l'Algérie comptera à l'horizon 2050 environ 2,1 milliards de m² de superficie de parc résidentiel bâti ou les bâtiments individuels occuperont près de 1,4 milliards de m² suivi des bâtiments collectifs d'une superficie estimée à 0,4 milliards de m².

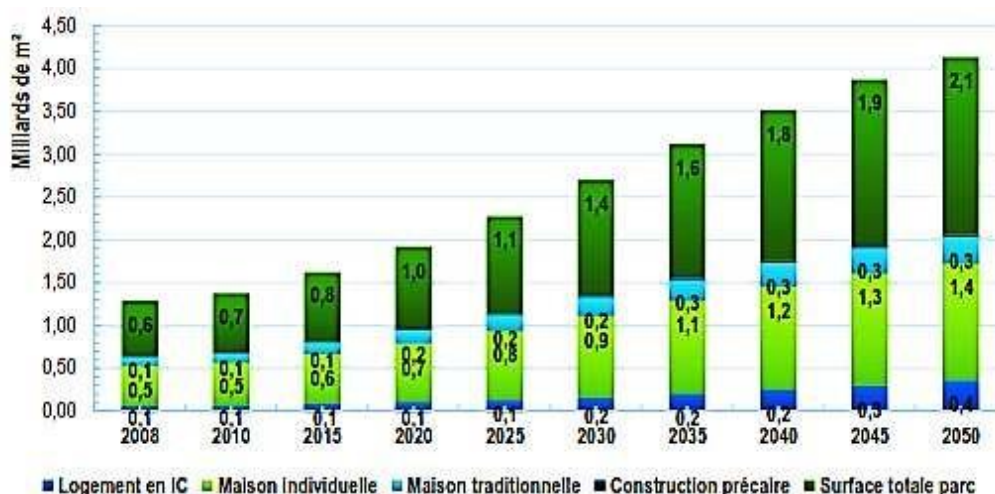


Figure II.14. Estimation de la surface du parc de logement à l'horizon en 2050 (Ouahab, 2015)

La zone B (Cf. Figure II.26) constitue 85% du nombre de bâtiments qui seront construits dans cette surface totale du parc de logements viendront ensuite les régions C, A, D₂ et D₂ avec des taux respectifs de 30%,9% et 1%.

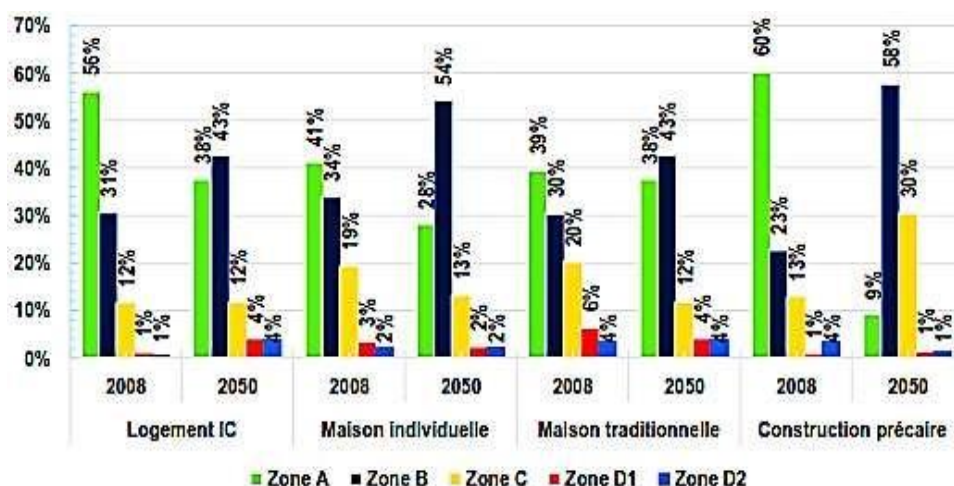


Figure II.15. Logement par typologie selon les zones climatiques en 2050 (Ouahab, 2015)

II.3.3 Consommation énergétique des bâtiments d'habitation

II.3.3.1 Consommation globale

Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie en Algérie, C'est un secteur non productif mais énergivore, puisqu'il consomme 43% de l'énergie finale, devançant le secteur industriel qui absorbe 22 % de l'énergie ainsi que le secteur des transports et celui de l'agriculture avec des taux respectifs de 33%et 1%" (APRUE, 2019) (Figure II.16).

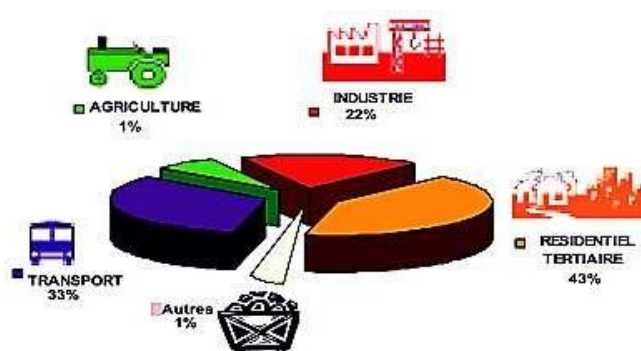


Figure II.16. Consommation finale d'énergies par secteur d'activité (APRUE, 2019)

La consommation énergétique dans le secteur résidentiel a connu une grande augmentation entre durant les vingt dernières années et ce a pour cause, principalement, l'augmentation du niveau de vie de la population algérienne (Figure II.17).

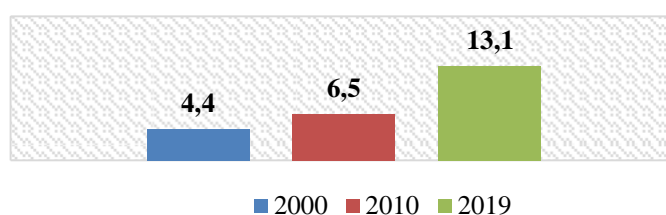


Figure II.17. Évolution de la consommation finale d'énergie de l'Algérie dans le secteur résidentiel (2000- 2019) (Unité : Millions de tonnes d'équivalent de pétrole) (DGRIS, 2021)

II.3.3.2 Consommation par type de logement et d'énergies

Selon l'agence Nationale de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE), en 2017, les bâtiments individuels représentaient 65% de la consommation énergétique totale puis les bâtiments collectifs (35%). Cette énergie consommée est divisée selon les types d'énergies à 65% pour le gaz naturel suivi de l'électricité à 19% puis le GPL et les fuels domestiques avec des taux respectifs de 13% et 0,01% (Figure II.18)

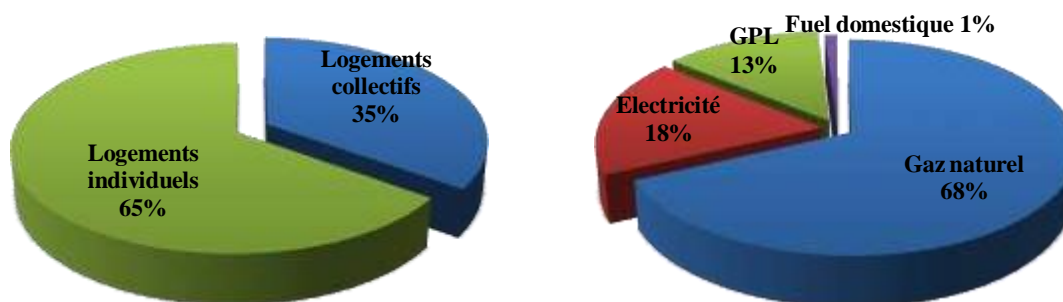


Figure II.18. Répartition de la consommation du secteur résidentiel par type de logement et d'énergies (APRUE, 2019)

II.3.3.3 Consommation par région

Il est clair que la zone B domine les besoins d'énergie à l'échelle régionale. En effet, avec près de 48.5 TWh la zone B représente l'équivalent de 41% des consommations totales du parc. Pourtant, cette zone est nettement moins peuplée que la zone A (2.36 millions de logements en zone A contre 1.7 millions en zone B). En revanche, d'un point de vue climatique, la zone B est considérée comme étant la plus froide. Ceci explique que l'écart en termes de nombre de logements est contrebalancé par différentiel significatif de la température extérieure ou de l'eau (Ouahab, 2015).

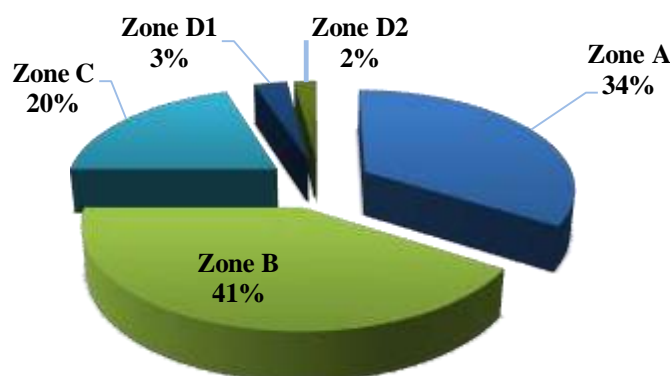


Figure II.19. Répartition de la consommation d'énergies par zone climatique (Ouahab, 2015)

La Figure II.21 est une synthèse de la désagrégation des consommations par typologie de logement et en fonction de la zone climatique. On s'aperçoit que dans toutes les zones climatiques, le segment des maisons individuelles détient la plus grande part de consommation d'énergie à l'échelle du parc, cette part représente 79.0 TWh (67%). La

consommation des maisons traditionnelles est estimée à près de 24.2 TWh (21%) les logements en IC et les constructions précaires consomment quant à eux respectivement 11.0 TWh et 3.2 TWh (soit 9% et 3% des consommations énergétiques du parc). Ce qui est relativement faible (Ouahab, 2015).

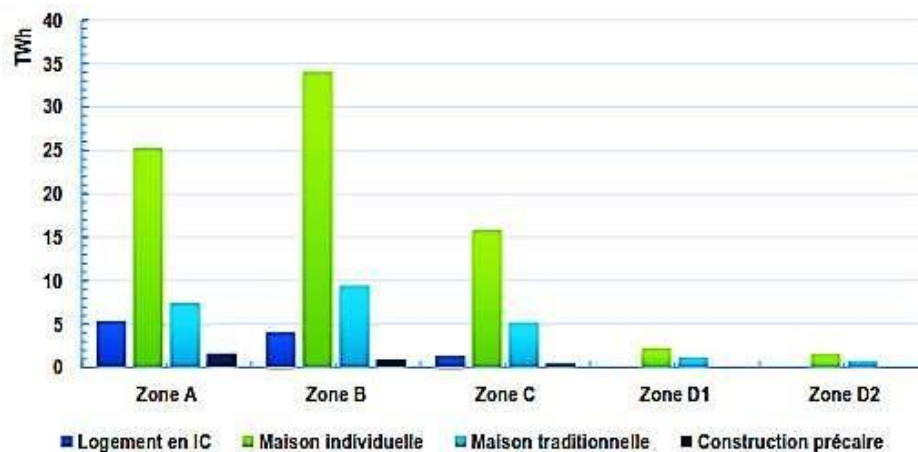


Figure II.20. Consommation du secteur résidentiel en 2008 par type de logement et selon les zones climatiques (Ouahab, 2015)

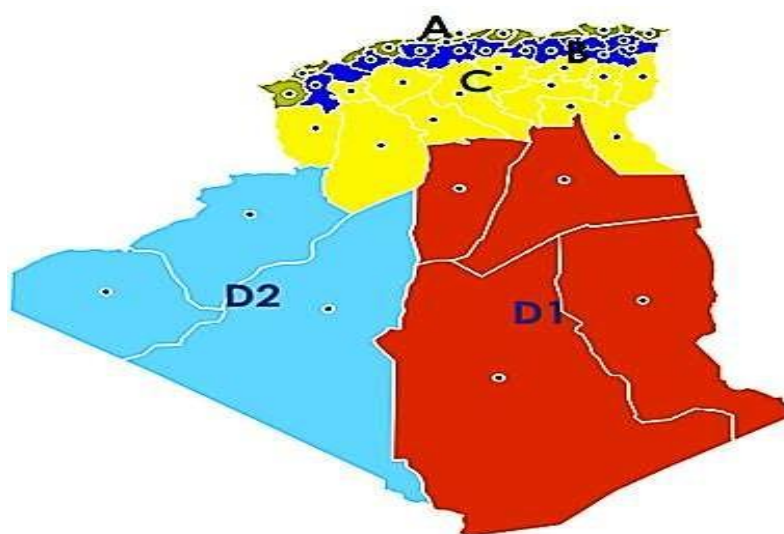


Figure II.21. Zones climatiques selon la réglementation thermique algérienne (Ouahab, 2015)

II.1.1 Impact environnemental (émission des GES)

Les émissions des gaz à effet de serre et en premier le CO₂ contribuent à changer le climat terrestre qui peut avoir des terribles conséquences sur l'être humain et son environnement. Selon l'agence de protection de l'environnement les émissions de dioxyde de carbone mondial représentent environ 80% des gaz à effet de serre. En Algérie, le secteur résidentiel représente environ de 36% en 2017 des émissions totales nationales. Cela revient aux brûleurs combustibles fossiles (gaz, pétrole) afin de produire de l'énergie et d'assurer confort dans ce secteur (chaleur, électricité, cuisine ...).

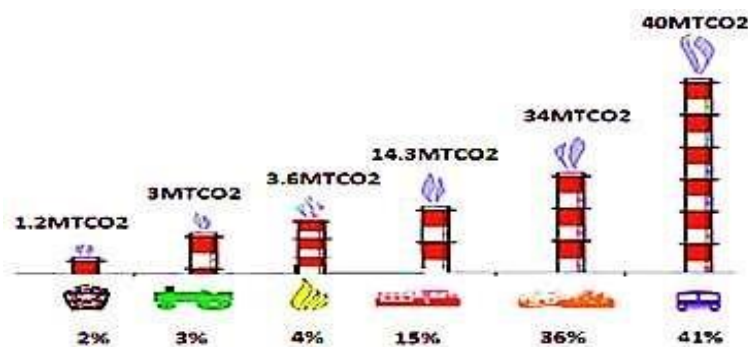


Figure II.22. Émission des GES par secteur en millions de teq CO₂ (APRUE, 2019)

Ces émissions de carbone augmentent la température globale en piégeant l'énergie solaire dans la couche d'ozone, ce qui modifie l'approvisionnement en eau et les conditions météorologiques et la croissance des cultures agricoles et menace les communautés côtières avec l'augmentation des niveaux de mer. A l'horizon 2050, les émissions du secteur résidentiel de CO₂ par type de logement type d'énergies ont fait l'objet des travaux de Ouahab (2015) est sont représentés dans les Figures II.23 et II.24.

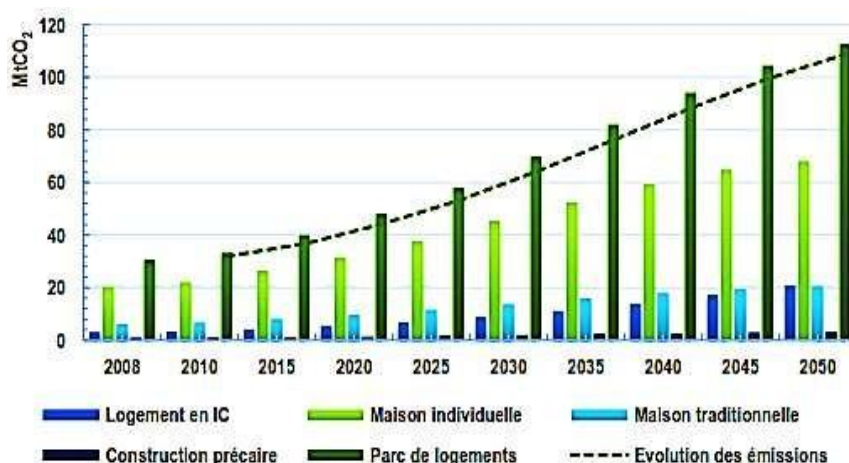


Figure II.23. Emissions de CO₂ par type de logement à l'horizon 2050 (Ouahab, 2015)

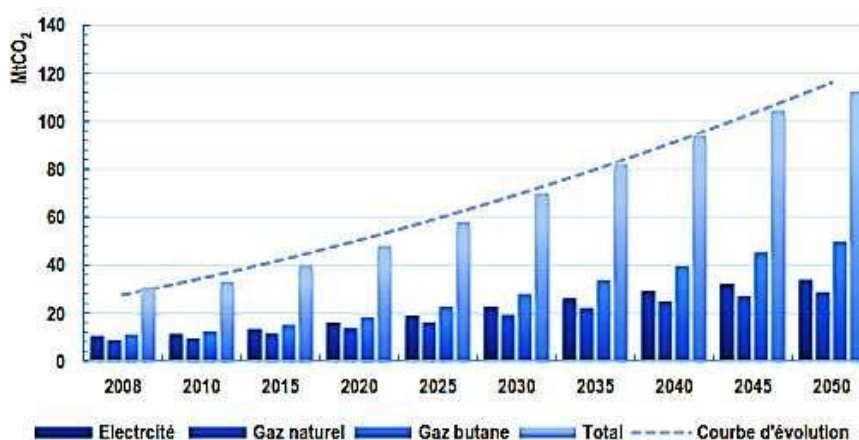


Figure II.24. Emissions de CO₂ par type d'énergies utilisé dans logement à l'horizon 2050 (Ouahab, 2015)

II.1.2 Gouvernance énergétique dans le secteur

L'énergie consommée dans le secteur résidentiel en Algérie passe par un ensemble d'organismes et d'institution qui la supervisent depuis la production jusqu'à ce qu'elle parvienne au consommateur. L'organigramme de la Figure II.25 clarifie la structure des organismes régissant les utilisations des énergies dans le secteur résidentiel.

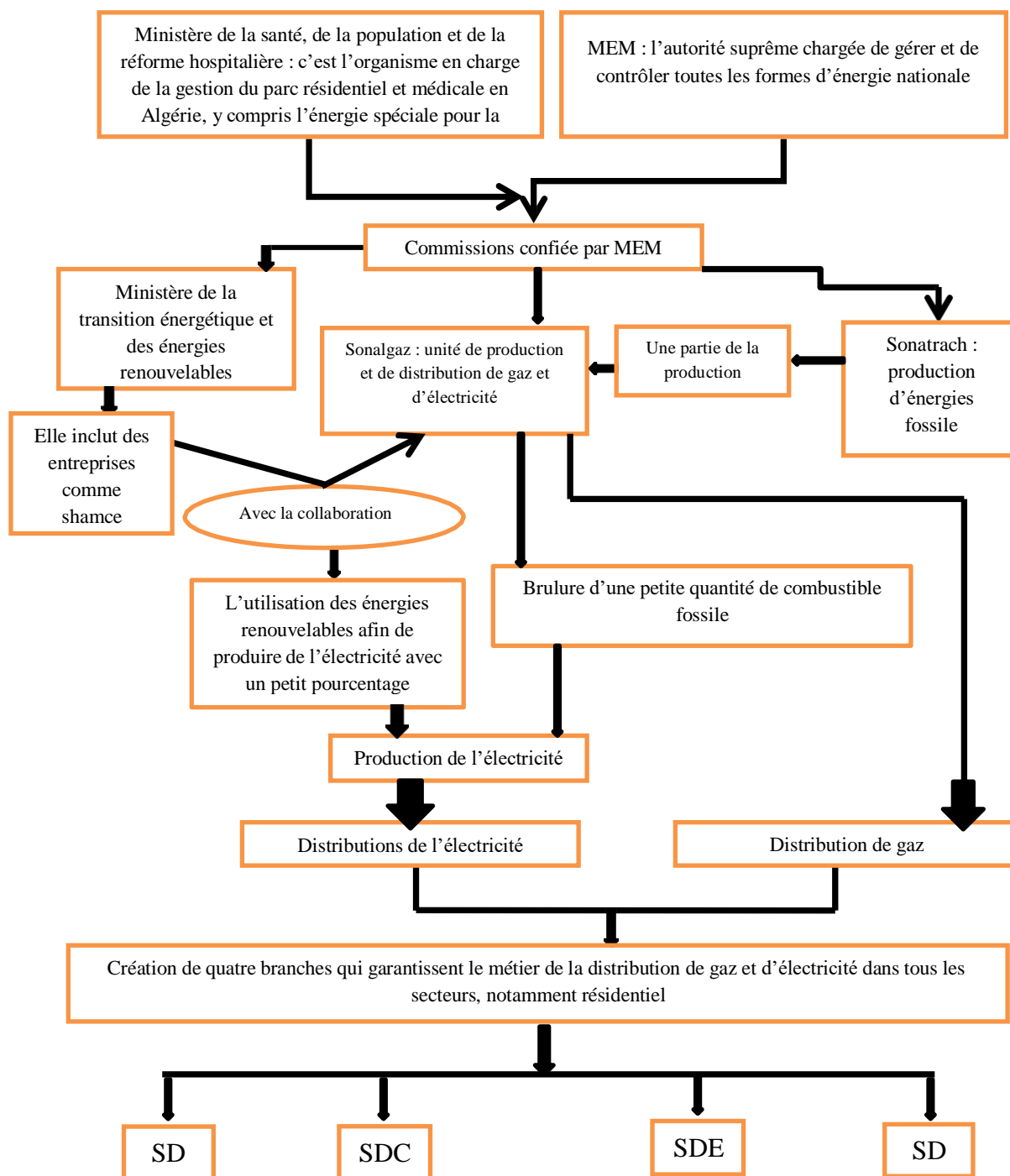


Figure II.25. Gouvernance énergétique dans le secteur résidentiel en Algérie.

II.4 Efficacité énergétique dans le secteur résidentiel – Etat des lieux et perspectives

II.4.1 Prise de conscience et émergence du concept

Le secteur des bâtiments est un acteur clé dans la lutte contre le changement climatique. La consommation d'énergie des bâtiments a augmenté rapidement ces dernières années ce secteur représente 43% de la consommation finale énergétique de l'Algérie en 2017. Pour faire face à cette situation, l'Algérie a élaboré un programme national d'efficacité énergétique qui se base sur l'objectif visant à la réduction de la consommation des énergies sans toutefois provoquer une diminution du niveau de confort ou de qualité de service dans les bâtiments.

II.4.2 Plan d'action du gouvernement dans le secteur

II.4.2.1 Adoption de la politique du développement durable et des objectifs du millénaire

Le développement durable, selon sa définition la plus communément acceptée (Rapport Brundtland), est « un développement qui satisfait les besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins ».

Les tentatives variées pour rendre ce concept opérationnel l'associent à un développement Économiques et sociaux équitables dans l'espace et le temps et à un équilibre écologique à long terme. L'Agenda 21, le programme d'action pour le 21^{ème} siècle, adopté à l'issue de la Conférence de la Terre (Rio 1992), est sans doute la plus importante de ces tentatives. Il se définit comme le guide de la mise en œuvre du développement durable pour le 21^{ème} siècle (Agora 21). Les Objectifs de développement du Millénaire (ODM) adopté en 2000 par l'assemblée générale des Nations unies dans sa déclaration dite du Millénaire (55/2), est une autre tentative qui a le mérite d'être chiffrée avec un horizon temporel défini Le Plan d'action de Johannesburg est la plus récente qui se définit du reste comme un instrument de relance de la mise en œuvre de l'agenda 21, compte tenu bien sûr des évolutions (mondialisation, NTIC, etc.) qu'ont connues l'économie et les relations internationales depuis Rio (Ait Ahmed, 2017).

Le développement durable se résume pour certains à un concept écologique. Cela signifie Que les processus d'évolution de nos sociétés doivent s'inscrire dans la durée sans altérer les capacités des écosystèmes qui subviennent à leurs besoins, pour laisser aux générations Futures un capital intact. Le développement durable implique donc d'exploiter les ressources Biologiques à un rythme qui n'entraîne pas leur appauvrissement, voire leur épuisement mais Rend possible le maintien indéfini de la productivité biologique de la biosphère. Cette forme De développement économique respecte l'environnement par une exploitation rationnelle et Modérée de la nature et de ses nombreuses ressources. C'est dans cette optique que le concept de transition énergétique a été mis en place. Il s'agit de progressivement abandonner les Énergies émettrices de gaz à effet de serre au profit des énergies renouvelables (Lazari, 2019).

Le Gouvernement algérien s'est engagé, dans le cadre du premier Rapport National sur l'État et l'Avenir de l'Environnement (RNE 2000), à préparer une Stratégie Nationale de l'Environnement et un Plan National d'actions pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD) (MATE, 2002). En 2015, l'Algérie a adopté les 17 objectifs de développement durable des Nations unies. Le pays a également ratifié l'accord historique de Paris (Cop 21, 2015) et s'est engagé à contribuer à l'effort collectif de réduction des gaz à effet de serre et d'adaptation aux changements climatiques et une réflexion en ce sens a déjà été réalisée et les grandes lignes d'une stratégie nationale de l'environnement et du développement durable pour l'horizon 2018-2035 ont été esquissées.

II.4.2.2 Programme d'Efficacité Énergétique en Algérie dans le secteur

L'Algérie a adopté en février 2011, un programme ambitieux des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Toute l'attention des pouvoirs publics est mobilisée afin de réussir ce programme basé sur une stratégie verte tracée à l'horizon 2030 (Baouchi, 2014).

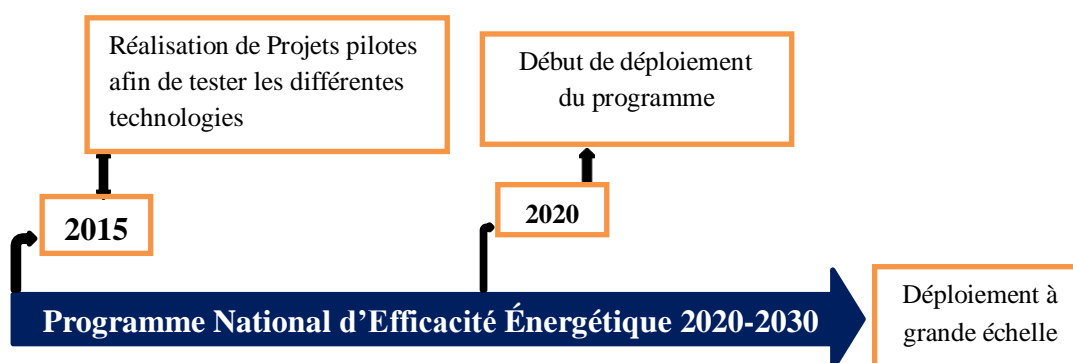


Figure II.26. Les phases de réalisation de programme national de l'efficacité énergétique

Le programme de l'efficacité énergétique affiche la volonté de l'Algérie de préserver les ressources du pays et optimiser leurs utilisations. Le potentiel d'économie d'énergie estimé à plus de 10 millions de tep à l'horizon 2030 soit plus de 15% (Baouchi, 2014).

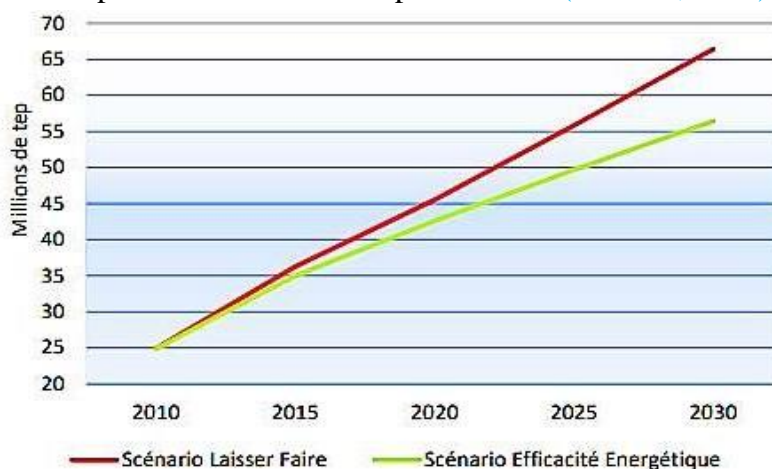


Figure II.27. Potentiel d'économie des énergies jusqu'à à l'horizon 2030

Les moyens d'encadrement de la politique nationale d'efficacité énergétique ont été définis dans le cadre de la loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie. Pour réussir l'application de cette politique le gouvernement a mis en place les organismes suivants :

- L'Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie, (APRUE) ;
- Le Fonds National de Maîtrise de l'Énergie, (FNME) ;
- Le Comité intersectoriel de maîtrise de l'énergie (CIME) ;
- Le Programme National de l'efficacité énergétique.

La loi relative à la maîtrise énergie témoigne des efforts des pouvoirs publics, notamment sur le plan législatif et réglementaire. L'objectif est de renforcer ce dispositif à travers la mise en œuvre de la réglementation portant notamment sur :

- La réglementation thermique dans les bâtiments neufs ;
- L'audit énergétique des établissements grands consommateurs ;
- La classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique ;
- Les modalités d'organisation et d'exercice du contrôle d'efficacité énergétique ;
- L'étiquetage énergétique.

II.4.2.3 Programme National d'Efficacité Énergétique pour le secteur du bâtiment d'habitation

Le programme vise à encourager la mise en œuvre de pratiques et de technologies innovantes, autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles. Des mesures adéquates seront prévues au niveau de la phase de conception architecturale des logements.

Il s'agit également de favoriser la pénétration massive des équipements et appareils performants sur le marché local, notamment les chauffe-eau solaires et les lampes économiques : l'objectif étant d'améliorer le confort intérieur des logements en utilisant moins d'énergie.

La mise en place d'une industrie locale des isolants thermiques et des équipements et appareils performants (chauffe-eau solaires ; lampes économiques) constitue l'un des atouts pour le développement de l'efficacité énergétique dans ce secteur.

Globalement, c'est plus de 30 millions de TEP qui seront économisées, d'ici 2030 répartie comme suit (MEM, 2021) :

- **Isolation thermique** : l'objectif est d'atteindre un gain cumulé évalué à plus de 7 millions de TEP ;
- **Chauffe-eau solaire** : l'objectif est de réaliser une économie d'énergie à plus de 2 millions de TEP ;
- **Lampe basse consommation (LBC)** : Les gains en énergie escomptés, à l'horizon 2030 sont estimés à près de 20 millions de TEP ;
- **Eclairage public** : l'objectif est de réaliser une économie d'énergie de près d'un (01) million de TEP, à l'horizon 2030 et d'alléger la facture énergétique des collectivités.

II.4.2.4 Programme des énergies renouvelable 2015 – 2030

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR). Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable (MEM, 2021).

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent (MEM, 2021).

A. Programme de développement des énergies renouvelables

À travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.

Les projets EnR de production de l'électricité dédiée au marché national seront menés en deux étapes (Tableau II.6) (MEM, 2021).

- **Première phase 2015 - 2020** : cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4010MW, entre photovoltaïque et éolienne, ainsi que 515 MW, entre biomasses, cogénération et géothermie.
- **Deuxième phase 2021 - 2030** : le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettons l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Béchar et leur intégration dans le système énergétique national. À cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable (MEM, 2021).

Tableau II.5. Programme des ER 2030 (en MWp)

Type d'énergies Renouvelables	Phase 2015-2020	Phase 2021-2030	TOTAL
PV (photovoltaïque)	3.000	10.575	13.575
Eolien	1.010	4.000	5.010
CSP	-	2.000	2.000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1.000
Géothermal	5	10	15
TOTAL	4.525	17.475	22.000

La consistance du programme en énergie renouvelable à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, réparties par filières, est représenté dans le Figure II.28 (MEM, 2021).

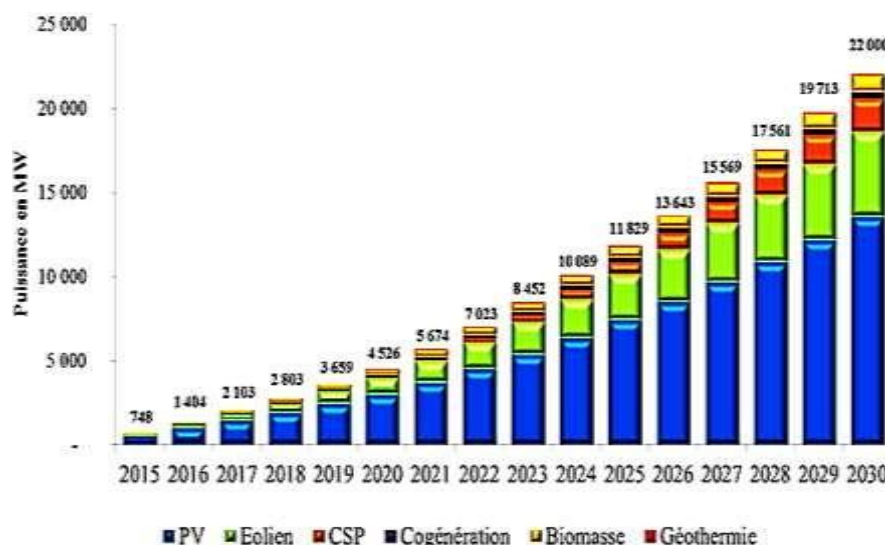


Figure II.28. La répartition des énergies renouvelables sur la période 2015-2030 (MEM, 2021)

II.4.2.5 Programme de construction de bâtiments à haute efficacité énergétique en Algérie

Afin de réduire et d'améliorer l'énergie utilisée dans les bâtiments, l'État algérien a développé un ensemble des programmes visant à construire des structures économes en énergie. Nous mentionnons ci-dessous les programmes adaptés par le gouvernement algérien.



Figure II.29. Programme de construction de bâtiments efficaces en Algérie

A. PROGRAMME ECO-BAT

Le secteur du bâtiment est à l'origine de 36% de la consommation d'énergie finale en Algérie. Les perspectives de développement du parc immobilier et le développement du secteur tertiaire engendrera un accroissement certain de la consommation d'énergie, par ailleurs avec son climat aride et semi-aride, l'Algérie est très vulnérable aux changements climatiques. en effet, on assiste à des étés caniculaires et des hivers très rudes , d'où la nécessité d'isoler les maisons pour à la fois améliorer le confort et réduire les consommations de chauffage et de rafraichissement .

L'enjeu économique est de taille, et de ce fait la maitrise de la consommation énergétique dans le bâtiment devient primordiale et constitue un défi pour les prochaines décennies.

Le programme (Eco-Bat) répond justement à cette problématique il a pour objet d'intégrer progressivement les mesures d'efficacité énergétique dans ce secteur stratégique (APRUE, 2021).

ECO-BAT qui vise à apporter le soutien financier et technique nécessaire à la réalisation de logements à haute performance énergétique dont la première phase incluse à la réalisation de 600 logements. Les travaux de construction de cette première tranche ont démarré en juin 2011, à travers 11 wilayas du pays, en collaboration avec les OPGI (Offices de la promotion et de la gestion immobilière) des wilayas concernées. Il s'agit d'Alger (50 logements), Skikda (50), Oran (80), Blida (80), Tamanrasset (30), Mostaganem (82), Béchar (30), Laghouat (32), Djelfa (80), El Oued (32) et Sétif (54). Ces logements pilotes qui sont actuellement en chantier seront progressivement livrés à leurs bénéficiaires.

Objectifs

Le programme (Eco-Bat) a pour objectif d'apporter un soutien technique et financier afin de réduire les consommations énergétiques liées au chauffage et la climatisation en agissant sur, notamment

- L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et l'isolation des toitures ainsi que l'utilisation de la menuiserie performante ;
- La limitation des transferts de chaleur entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur ;
- La mobilisation des acteurs du bâtiment autour de la problématique de l'isolation thermique ;
- La formation d'une main d'œuvre qualifiée ;
- La création d'un marché durable et compétitif des matériaux et équipements contribuant à l'isolation thermique (APRUE, 2021).

B. Programme ECO-LOMIERE

L'éclairage domestique est à l'origine de 32% de la consommation électrique des ménages algériens ; il est également responsable de la formation de la pointe hivernale de la demande

nationale en électricité, en raison du nombre important de points lumineux dans les ménages qui avoisine les 70 millions, ainsi que le type de lampes utilisées qui est constitué majoritairement de lampes à incandescence. Par conséquent, le recours aux lampes à basse consommation du type LED, représente une opportunité, pour à la fois réduire la consommation électrique et écrêter la pointe nationale ; quand on sait que le potentiel global d'économie d'énergie de l'éclairage intérieur domestique est à 5000 GWh par environ, soit l'équivalent d'une centrale électrique de 500MW (APRUE, 2021).

Objectifs

- Réduire la facture d'électricité des ménages, la consommation nationale d'énergie ainsi que les émissions de gaz à effet de serre ;
- Favoriser l'émergence d'un marché nationale de lampes à basse consommation ;
- Bannir à terme l'usage des lampes énergivores (APRUE, 2021).

C. PROGRAMME ALSOL

L'Algérie est un pays ensoleillé, avec une durée d'insolation qui peut atteindre parfois les 3900 heures par an, notamment dans les Hauts-Plateaux et dans le sud, ces conditions qui sont très favorables pour le développement de la filière solaire, notamment thermiques.

Tandis que d'un autre côté , le chauffe-eau solaire reste peu développé en Algérie en raison notamment de son prix qui avoisine dix à douze fois le prix d'un chauffe-classique et de l'absence d'une industrie locale , pour pallier cette carence , une stratégie de promotion de cet équipement a été mise en place pour justement lever les principaux obstacles et lancer la promotion de cette filière par des mesures incitatives à travers un soutien financier à hauteur de 45% du cout de la fourniture et l'installation et donner de la visibilité aux investisseurs potentiels (APRUE, 2021).

Objectifs

L'objectif de ce programme est de vulgariser et généraliser le chauffe-eau solaire notamment sans le logement individuel, les établissements de santé, etc.

- Favoriser la création d'un marché durable du chauffe-eau solaire ;
- Favoriser l'implantation d'une industrie locale du chauffe-eau solaire
- Renforcer et développer les entreprises de service locales spécialisées dans l'installation et la maintenance des chauffe-eau solaires
- Réduire le recours au gaz naturel et aux GPL pour le chauffage de l'eau solaire
- Réduire les émissions de gaz à effet de serre (APRUE, 2021).

D. Appareils électroménagers

À la faveur du développement du marché des équipements électroménagers et de l'amélioration du cadre de vie, les ménages s'équipent de plus en plus, ce qui n'est pas sans

conséquence sur la consommation énergétique des ménages qui s'accroît de manière exponentielle durant ces dernières années.

L'étude menée par l'APRUE, dans ce cadre a mis en évidence quatre postes de consommation énergivore, les climatiseurs, les machines à laver et l'éclairage, qui représentent à eux seuls 80% de la consommation globale des ménages, d'où la nécessité, d'engager un programme visant l'amélioration d'efficacité énergétique des équipements électroménagers commercialisés sur le marché national et ciblant.

A cet effet, l'implication de l'ensemble des acteurs (fabricants, distributeurs, organismes de contrôle et consommateurs) constitue un préalable pour la réussite du programme d'efficacité énergétique des équipements électroménagers, par rapport à la mise en place de la réglementation y relative qui même temps tenir compte des contraintes d'adaptation des fabricants l'objectif étant de transformer, progressivement le marché des équipements électroménagers en favorisant la pénétration des équipements les plus performants.

La finalité étant de réduire les dépenses des ménages liées à la l'énergie, et par conséquent éviter les investissements liés à la production d'énergie et contribuer à la préservation de l'environnement (APRUE, 2021).

Objectifs

L'objectif de ce programme est de vulgariser et généraliser le chauffe-eau solaire notamment dans le logement individuel, les établissements du tertiaire à savoir les écoles et les cantines scolaires, les mosquées, les hôtels les établissements de santé, etc.

- Sensibiliser les fabricants pour l'amélioration de la performance énergétique des produits ;
- Identifier les besoins en infrastructures dédiées au contrôle de l'efficacité énergétique
- Sensibiliser les consommateurs sur les avantages liés à l'efficacité énergétique et de son intégration en tant que critère lors de l'achat des appareils électroménagers (APRUE, 2021).

II.1.3 Acteurs de l'efficacité énergétique dans le secteur

Les acteurs de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel vont des agences et ministère aux centres scientifiques tels que les universités et les instituts. Mais l'objectif reste le même qui est d'améliorer la performance énergétique des logements, par élaboration des programmes pour la construction de logements économes en énergie et ainsi que l'introduction des énergies renouvelables dans ce secteur. La FigureII.30 représenter la plupart des acteurs de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel en Algérie.

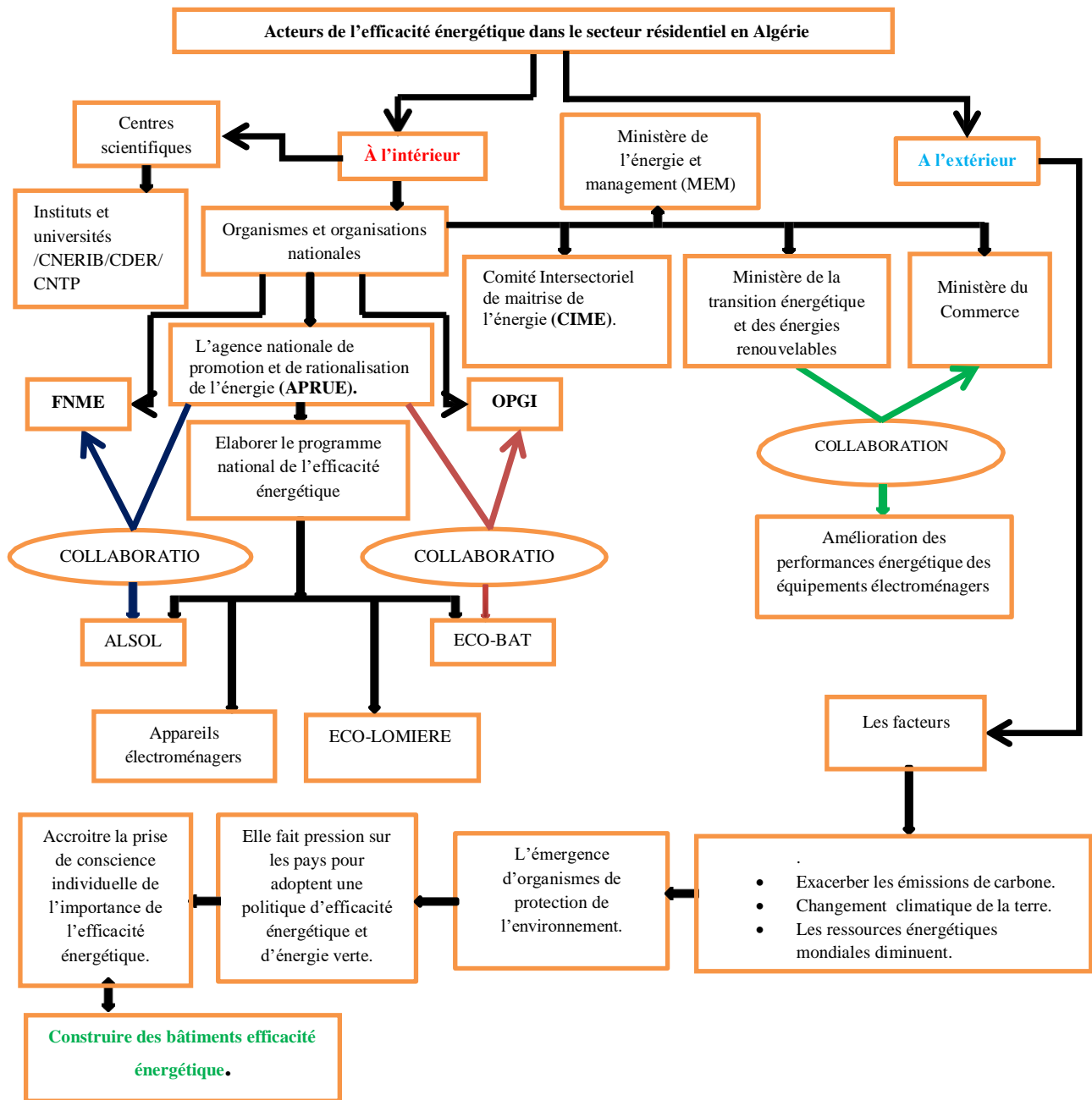


Figure II.30. Acteurs de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel en Algérie

II.5 Conclusion

Quand on parle d'énergie en Algérie, notre réflexion va directement aux énergies non renouvelables et cela est vrai parce que l'Algérie est l'une des plus grandes sources et contributeurs de ce type d'énergie (gaz, pétrole...). Elle utilise cette énergie dans ses échanges commerciaux et surtout dans la mise en mouvement de la roue du développement dans tous ses secteurs, notamment le résidentiel.

De par sa situation géographique et la diversité de son climat, l'Algérie est également riche en source énergies renouvelables notamment l'énergie solaire et cela est dû au fait que la

majorité de la superficie de l'Algérie est désertique, donc l'exposition de cette région au rayon du soleil se fait pendant de longues périodes. Mais malgré cela le secteur des énergies renouvelables en Algérie est fragile, cela est dû à la dépendance du gouvernement vis-à-vis des énergies fossiles pour répondre à ses besoins.

Le secteur résidentiel en Algérie occupe la première place dans la consommation d'énergie et le deuxième après le secteur des transports dans l'émission de dioxyde de carbone.

En raison de l'augmentation alarmante de la consommation d'énergie et des émissions de carbone du secteur résidentiel ces dernières années et de la diminution des réserves d'énergie fossile, le gouvernement algérien a eu recours à la révolution de ce secteur en introduisant les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique pour répondre à ses problèmes dans ce domaine et activer la politique des énergies vertes.

L'efficacité énergétique d'un bâtiment regroupe les technologies et les pratiques permettant de diminuer la consommation d'énergie pour un niveau de performance et de confort optimal. Moins un bâtiment consomme d'énergie, plus son efficacité et donc sa performance sont élevées. L'efficacité énergétique dans le bâtiment est donc un indicateur précieux pour répondre en partie aux enjeux énergétiques actuels.

Nous concluons que le concept d'efficacité énergétique et de transition énergétique (énergie renouvelable) dans le secteur résidentiel est un impératif que l'Algérie doit suivre pour réduire la consommation énergétique sans pour autant nuire au confort thermique. Malgré les efforts de l'état algérien dans ce domaine, le niveau requis n'est pas atteint.

Chapitre 03

**Développement d'une
méthodologie d'évaluation
de la performance
énergétique des bâtiments
d'habitation en Algérie**

III.1 Introduction

La situation géographique et le climat chaud et sec en été et froids et pluvieux en hivers d'une part et l'augmentation continue des espaces urbains et la propagation des bâtiments qui contredisent le concept d'efficacité énergétique d'autre part ont fait que le secteur résidentiel en Algérie soit le plus gros consommateur d'énergie. La majorité des énergies consommées provient de sources non renouvelables, et la consommation de cette énergie contribue grandement au changement climatique.

Cette situation sus-exposée fait que la définition de nouveaux programmes de construction de logements énergétiquement efficace est une priorité nationale pour répondre aux enjeux majeurs de notre époque et des prochaines décennies.

La réalisation d'une base nationale solide en terme de construction de bâtiments énergétiquement efficace passe par la connaissance des indicateurs clés contribuant à la mise en place d'une réelle politique d'efficacité énergétique.

Nous essayerons, dans ce chapitre de faire un vrai diagnostic des indicateurs d'efficacité énergétique et de définir une note de l'efficacité énergétique (indice de performance énergétique (IPE)) qui refléterait la qualité énergétique de bâtiments résidentiels en Algérie.

III.2 Méthodologie proposée

III.2.1 Portée de l'étude

Cette étude a pour but de servir de base au développement futur d'un outil avancé d'évaluation de la performance énergétique des villes algériennes. De ce fait, elle doit être particulièrement adapté aux cas spécifiques de l'Algérie, au mode de construction locale, à la société et aux normes nationales. La recherche vise à faire face aux problèmes mentionnés dans le chapitre précédent et à la mise en œuvre une réelle méthodologie pour l'évaluation de la performance énergétique se basant sur la littérature du chapitre 01.

III.2.2 Structure de la méthodologie

Le travail d'évaluer la performance énergétique des bâtiments d'habitation est un enjeu complexe est difficile à faire. Pour répondre à cette problématique, la simplification du problème, initialement complexe, à travers sa décomposition en une série de problèmes facilement évaluable est une nécessité.

Deux démarches s'opposent traditionnellement concernant la construction d'un processus d'évaluation comme celui de notre travail : une démarche « experte », dite « top-down », basée essentiellement sur les connaissances en matière d'énergies et d'ingénierie du bâtiment et une démarche « Bottom-up », fondée les connaissances de méthodes de décision et de recherche opérationnelle.

La méthode que nous proposons (Figure III.1) utilise des objectifs représentant les aspects principaux du projet quantifiés suivant un schéma descendant. Chaque objectif d'un projet du bâtiment d'habitation est évalué par l'intermédiaire d'un ensemble de critères et d'indicateurs de performance (IPs) facilement évaluable. Cette procédure fait l'objet des approches descendantes permettant aux experts de diviser le problème en un ensemble de sous problèmes simples à résoudre et à évaluer.

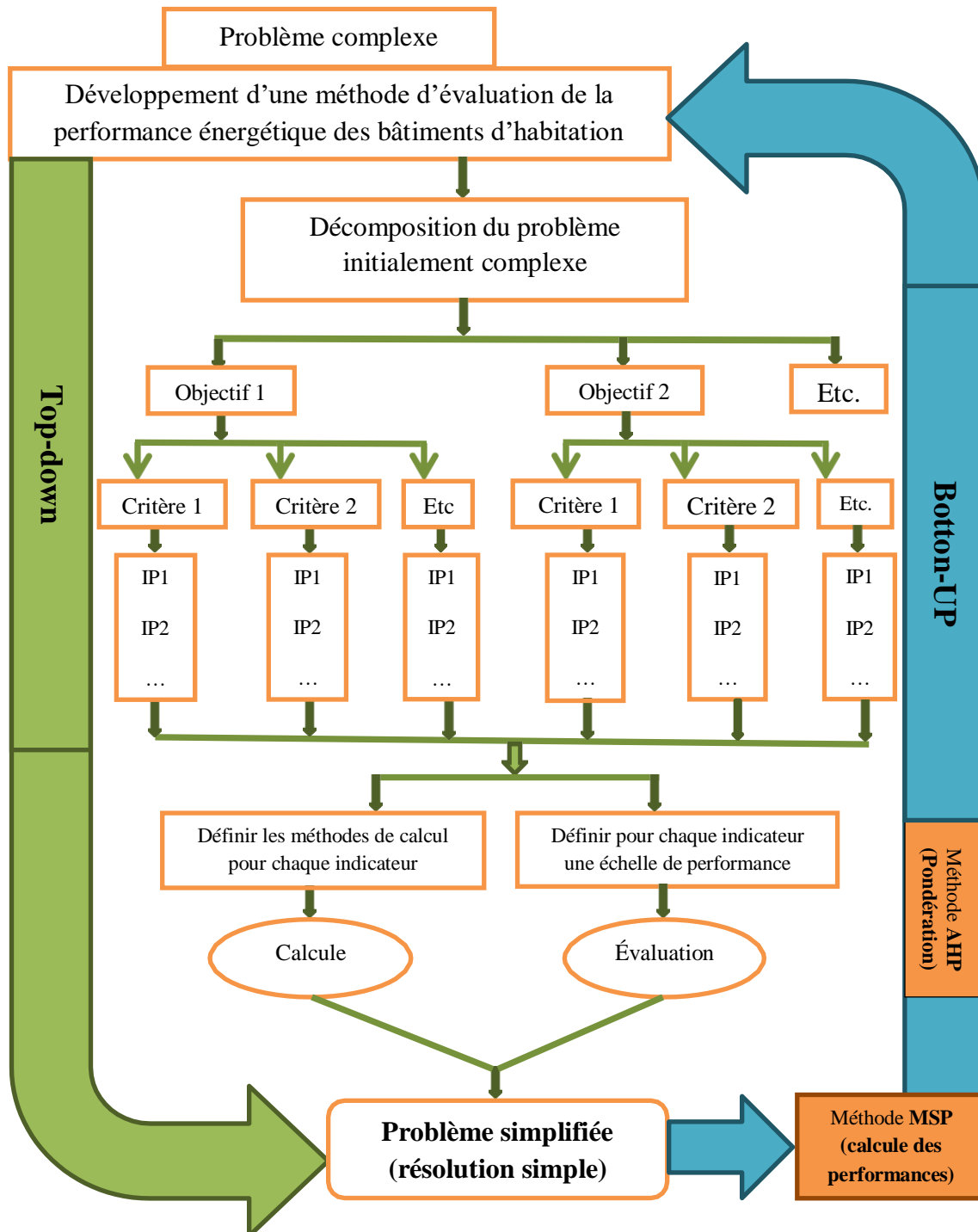


Figure III.1. Méthodologie adoptée pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation

Pour remonter et revenir à l'estimation du problème initial, il faut utiliser les approches ascendantes. Ces approches permettent au décideur de rassembler les différents paramètres de l'évaluation (objectifs, critères et IPs) et ainsi résoudre le problème complexe.

Ainsi, le cœur de notre méthodologie sont les indicateurs de performance.

III.2.2.1 Définition d'un IP

L'utilisation du concept d'indicateur a initialement servi en sociologie. Il y désignait la Traduction de concepts théoriques (abstraites) en variables observables. Après un déclin D'utilisation dans les années 60, il a récemment resurgi et devient maintenant un concept Indissociable des approches performatrice. Son utilisation est de plus en plus courante et il Acquiert une importance grandissante dans le processus décisionnel (Boulanger, 2004).

D'après (Cherqui, 2005), de nombreuses définitions du terme indicateur existent ; parmi elles On retient la définition suivante : « Modèle qui simplifie un sujet complexe ».

III.2.2.2 Modes d'évaluation des IPs :

L'évaluation des indicateurs peut être (Cherqui, 2005) :

- Quantitative : mesures directes ou par modélisation ;
- Qualitative : une appréciation telle que bon, moyen, mauvais ;
- Binaire : présente ou ne présente pas la performance ;
- Par avis d'expert : à l'aide des expériences et les travaille récents des autres.

III.2.2.3 Eléments d'évaluation de la performance :

La méthode proposée dans ce travail, doit fournir des informations concises pour permettre une vue d'ensemble. Elle prend en compte dès le départ les données disponibles, pour évaluer la performance des indicateurs et des critères de chaque objectif. Ainsi, les éléments-clés pour l'évaluation des performances est (Zekiouk, 2009) :

- **Données** : sont considérées comme nourritures ou alimentation pour avoir le résultat final qu'on cherche. Ce niveau est le point d'entrée de l'évaluation alors les données permettent d'alimenter les indicateurs pour effectuer l'évaluation. A ce niveau on n'a pas besoin de calculer la performance.
- **Indicateurs de performance** : C'est le niveau clé de l'évaluation. Un critère peut être évalué avec plusieurs indicateurs. Ces indicateurs sont alimentés par des données brutes. La performance de chaque indicateur (PI_i) est calculée quantitativement ou qualitativement.
- **Critères** : C'est le niveau supérieur de l'évaluation des performances. La performance d'un critère (PC_i) est calculée en fonction des performances des sous-critères ou bien des indicateurs (PI_i).
- **Objectifs** : Pour ce niveau, la performance est évaluée et nous pouvons visualiser

l'ensemble des performances des critères qui compose le sous-objectif. Cela permettra de faire des comparaisons à ce stade entre les différentes variantes.

III.2.3 Approche diagnostique descendante "Top-Down"

Une approche descendante, ou approche *top-down* (de haut en bas en français), implique des processus qui, à partir d'un problème complexe, visent à forger celui-ci, à le transformer par étapes en éléments facilement mesurables.

L'approche diagnostique Top-down est une approche descendante de description des objectifs, qui consiste en un diagnostic approfondi de la performance énergétique (DPE) des bâtiments existants. Ce diagnostic passe par l'identification et la définition de différents paramètres de l'efficacité énergétique, des plus globaux (objectifs de performance) aux plus détaillés (indicateurs de performance).

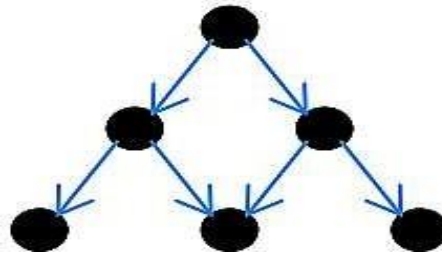


Figure III.2. Schéma illustrant les principes de modélisation "Top-Down" (Thorel, 2006)

III.2.3.1 Processus de l'approche Top-down

L'approche descendante "Top-down" (Figure III.2) suit la logique suivante :

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

III.2.3.2 Démarche de construction des IPs

Afin d'établir un ensemble complet d'indicateurs une combinaison de l'examen des méthodes existantes, des codes de l'énergie et des documents de recherche universitaires est nécessaire. La démarche d'identification des indicateurs est illustrée dans la Figure III.3.

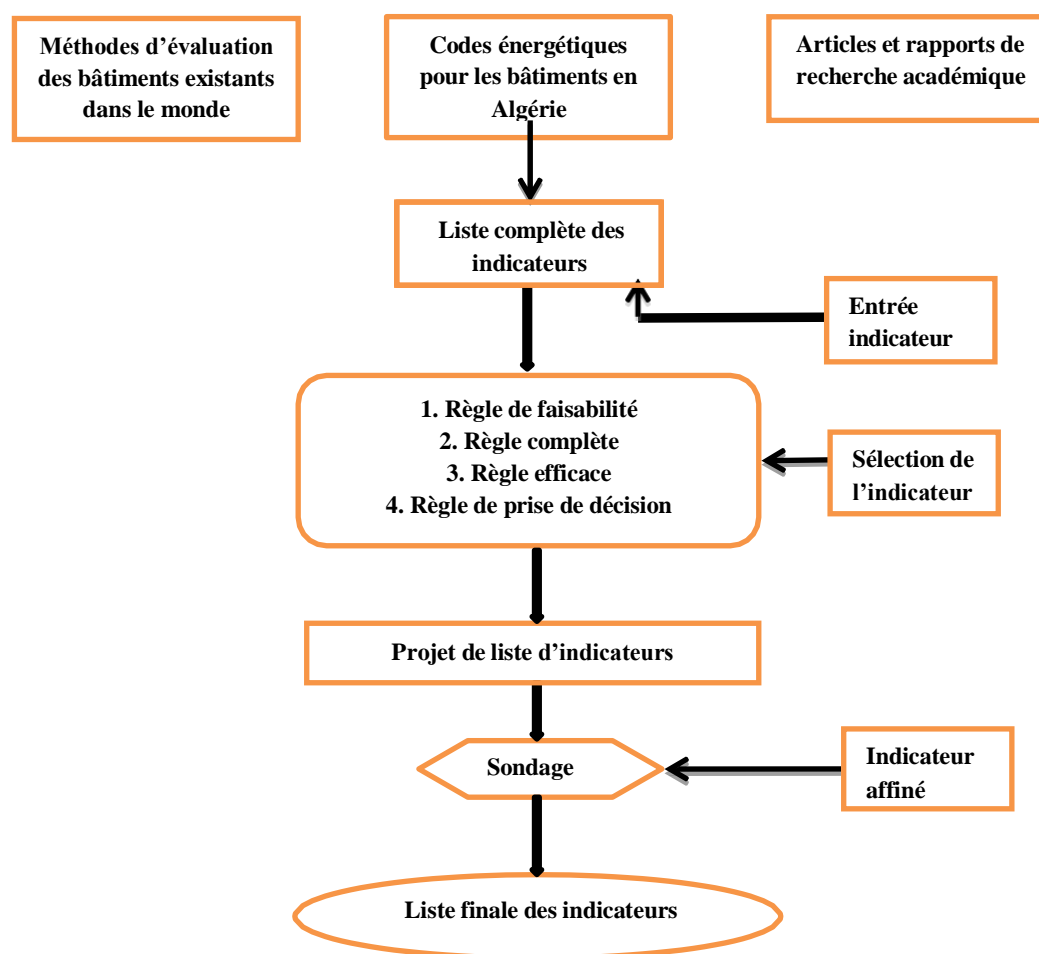


Figure III.3. Méthode d'identification des indicateurs

La liste finale des IPs de l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation, d'après la littérature consultée (Yang, 2010), est représentée ci-dessous :

Tableau III.1. Liste finale des IPs pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation

Indicateur	Indicateur
1. emplacement du bâtiment	13. qualité de l'air intérieur du chantier
2. Zone de couverture végétale extérieure	14. Contrôle du système de climatisation
3. Réduction de la pollution lumineuse	15. Humidité de l'environnement thermique intérieur
4. Conservation de l'eau	16. Éclairage naturel et extérieur paysage
5. Émission de CO ₂	17. Minimiser l'énergie Ressources consommation
6. Optimisation de l'utilisation de l'énergie	18. Propriétés thermiques de l'enveloppe du bâtiment
7. Énergie verte	19. Espace sec
8. Gestion des déchets de construction	20. Étiquetage respectueux de l'environnement des installations du bâtiment
9. Réutilisation du matériel Ressources	21. Éclairage intérieur
10. Recyclage des matériaux de construction	22. Extérieur éclairage
11. Surveillance du CO ₂ intérieurs	23. Transports publics

Tableau III.2. Liste finale des IPs pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation (Suite)

Indicateur	Indicateur
24. Espace de rangement pour vélos	55. Émission de gaz à effet de serre gaz
25. Infrastructure du bâtiment résidentiel	56. Qualité de l'air intérieur
27. Artificiel éclairage installations	57. Remboursement des investissements dans la conservation de l'énergie
28. Renouvelable et bas carbone _ sources d'énergie	58. Utilisation de l'industrie eaux usées
29. Travail à la maison	59. Toute l'année électricité consommation
30. Acoustique isolation	60. Sensibilisation a la conservation de l'énergie
31. Privé espace	61. Pollution électromagnétique
31. Guides d'économie d'énergie pour les occupants	62. Coût et économie
33. Prévenants constructeurs	63. Impacts sociaux
34. Utilisation de techniques innovantes	64. Bruit
35. Utilisation du sol Chauffer	65. Rapport d'email du mur
36. Acoustique intérieure environnement	67. Forme du bâtiment
37. Visuel intérieur environnement	68. Aération
38. Utilisation directe des énergies renouvelables sources d'énergie	70. Réduction des entrées rayonnement solaire dans les zones résidentielles
39. Utilisation indirecte des énergies renouvelables sources d'énergie	71. Densité de la zone de construction résidentielle
40. Climatisation installations	72. Taux de couverture végétale de la zone résidentielle
41. Installations de ventilations	73. Distance entre les bâtiments
43. Approvisionnement en eau chaude	74. Valeur de charge partielle intégrée (IPLV)
44. Ascenseurs	75. Couleur des enveloppes extérieures du bâtiment
45. Énergie - installations de construction efficaces	76. Utilisation de l'énergie solaire énergie
46. Gestion de l'exploitation du bâtiment	77. Ombrage coefficient d'externe les fenêtres
47. Utilisation de l'eau de pluie	78. Couverture végétale des toits
48. Réutilisation des ressources	79. Horaire chauffage charge calcul
49. Planification du projet	80. Horaire refroidissement charge calcul
50. Utilisation de matériaux de construction écologiques	81. Chaleur mesure du système de chauffage central
51. Réutilisation des enveloppes des bâtiments	82. Énergie efficacité du chauffage central à pompe systèmes
52. Réutilisation des matériaux de construction	83. Énergie efficacité du système d'approvisionnement en eau
53. Évitez l'utilisation de gaz fréon et halon	84. Éclairage installations

III.2.3.3 Tableau de bord des IPs de la performance énergétique des bâtiments d'habitation en Algérie

Une fois la liste des IPs de performance finale recensé, une adaptation au contexte locale du cas de l'Algérie nous a permis de définition un ensemble d'IPs à intégrer dans un premier lieu dans notre méthodologie (Tableau III.3).

Tableau III.3. Tableau de bord des IPs de l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation

Objectif	Critère	IP	Symbole	Référence
Conception du bâtiment	Orientation	Orientation du bâtiment	OR	(Rahmouni2020)
		Ratio de la façade orienté	RFO	(Kim, 2005)
	Morphologie	Nombre des niveaux	N_{étage}	(Amirat et al., 2011)
		Compacité du bâtiment	C_P	(Rahmouni, 2020)
	Couleur des parois	Couleur des parois intérieures	C_{int}	(Mehira, 2021)
		Couleur des parois extérieures	C_{ext}	
	Ouverture	Coefficient de gain de soleil	S_w	(Helleux, 2019)
		Indice Windows	U_w	
		Forme de fenêtre	FF	(Rahmouni, 2020)
	Aspect architectural	Distance entre les bâtiments	d_w	(Yong, 2010)
		Ventilation naturelle	V_{nat}	(Camara, 2018)
		Humidification	H_{umi}	
		Protection solaire	P_s	
	Chauffage solaire passif	CH_{auff}		
	Implantation	Zone climatique	ZC	(Benoudjafer, 2018)
Altitude		A_{lti}		
Performance de l'enveloppe	Caractéristique physique des matériaux	Conductivité thermique	λ	/
		Diffusivité / Effusivité	D / E	(Camara, 2018)
	Isolation	Déperdition thermique par transmission	D_T	(Yong, 2010)
		Utilisation d'un isolant	UT_{iso}	
		Nature de l'isolant utilisée	N_{iso}	
Consommation des énergies	Consommations des EF	Electricité	ELE	(Yong, 2010)
		GAZ	GAZ	
	Consommation des ER	Intégration des ER	Inté_{ER}	(Kim, 2005)
		Ratio de consommation E _R /E _F	R_{R/F}	
Confort thermique	Ambiances intérieur	Humidité intérieure du bâtiment	H	(Yong, 2010)
		Température intérieure du bâtiment	T	
		Eclairage intérieur	Φ	
Utilisation et fonction	Efficacité énergétique des équipements	Classe énergétique des équipements	CEE	/
		Systèmes de chauffage et refroidissement à base d'RR	S_{YS}	(CoExpert, 2018)
	Usage des énergies	Utilisation des nouvelles technologies	UT_{ntech}	
		Utilisation d'un manuel d'aide à l'usage	UT_{mdl}	
Impact environnemental	Pollution	CO ₂ émissions à partir de la consommation des énergies	EM_{CO2}	(Yong, 2010)
		Utilisation des matériaux respectivement l'environnement	UT_{mr1}	

III.2.3.4 Méthodes de calcul des IPs

La deuxième étape, après la définition des IPs, est leur calcul. En effet, une méthode de calcul doit être assimilée à chaque IP. Ces méthodes de calcul peuvent être des normes, des relations de calcul analytique et/ou empirique ou semi-empirique, des modélisations par logiciels de calculs, etc. Le Tableau III.4 résume les méthodes de calcul des IPs de notre méthodologie.

Tableau III.4. Tableau des méthodes de calcul des IPs

Critère	IP	Méthode de calcul	Unité	Référence
Orientation	OR	Norme	/	(MHU,2001)
	RFO	(surface orienté /surface totale)×100	%	(Kim, 2005)
Morphologie	N _{étage}	Nombre d'étage	/	/
	C _P	$C_p = \frac{V}{S}$ (V : volume du bâtiment et S : surface au sol)	m ⁻¹	(Rahmouni2020)
Couleur des parois	C _{int}	Essais au laboratoire	/	(Mehira, 2021)
	C _{ext}			
Ouverture	S _w	Essais au laboratoire (entre 0 et 1)	/	(Helleux, 2019)
	U _w	Essais au laboratoire	W/m ² K	
	FF	Norme	/	(Rahmouni, 2020)
Aspect architectural	d _w	d _w =W/H ; W : distance entre bâtiments, H : hauteur du bâtiment	/	(Mehaoued, 2019)
	V _{nat}	Techniques de conceptions architecturales (Cf. Figures III.4 à III.7)	/	(Camara, 2018)
	H _{umi}			
	P _s			
CH _{auff}				
Implantation	ZC	Réglementation algérienne	/	
	A _{lti}	Mesure d'altitude (Google earth)	m	(Benoudjafer, 2018)
Caractéristique physique des matériaux	λ	$\lambda_{moy} = \frac{\lambda_i}{n}$ λ _i : conductivité des matériaux utilisés et n : nombre de matériaux	W/m.C°	/
	D / E	$D = \frac{\lambda}{\rho \times C}$ ρ : poids volumique du matériaux et C : température	m ² /S	(Camara, 2018)
		$E = \sqrt{\lambda \times \rho \times C}$	J/K _g .K	
Isolation	D _T	La méthode de calcul est détaillée dans la norme algérienne de calcul des déperditions calorifiques	Watts/C°	(DTR C 3-2)
	UT _{iso}	/	/	/
	N _{iso}	Les caractéristiques sur la nature des isolants sont données dans les fiches techniques	/	(D.T.R.C 3-2)

Tableau III.5. Tableau des méthodes de calcul des IPs (Suite)

Critère	IP	Méthode de calcul	Unité	Référence
Consommations d'énergie fossile	ELEC	$\frac{\text{semestre1} + S2 + S3 + S4}{\text{surface habitable}}$	Kwh/m ² /an	/
	GAZ	$\frac{\text{semestre1} + S2 + S3 + S4}{\text{surface habitable}}$	Kwh/m ² /an	
Consommation des ER	Inté _{ER}	Existence d'un isolant	/	(Yong, 2010)
	R _{R/F}	(E _R /E _F)×100	%	(Kim, 2005)
Ambiances intérieur	H	Appareille (hygromètre)	%	/
	T	Appareille (thermomètre)	C° ou K	
	Φ	$S_{\text{pièce}} \times N_{\text{lux}} \times \left(\frac{1}{R_{\text{lemp}}}\right) \times \left(\frac{1}{\text{Coeff de réflexe}}\right)$ S _{pièce} : superficie de la pièce N _{lux} : nombre de luxe R _{lemp} : Rendement lumineux Fac de réf : Facteurs de réflexion	lumens	(Silamp, 2021)
Efficacité énergétique des équipements	CEE	$CEE = \sum_{i=1}^n \frac{CEE_i}{n}$ CEE : classe énergétique des équipements et n : nombre d'équipements	Kwh/an	/
	S _{YS}	Existe ou non	/	/
Usage des énergies	UT _{ntech}	Existe ou non	/	/
	UT _{mdl}	Disponibilité di manuel ou non	/	/
Pollution	E _{CO2}	$ECO_2 = (CE \times) + (CG \times f_G)$ CE et CG : consommations d'électricité et de gaz et f _E et f _G sont les facteurs d'émissions de l'électricité et du gaz	Kg e-Co ₂ /m ² /an	(Yong, 2010)
	UT _{mr1}	Oui ou non	/	

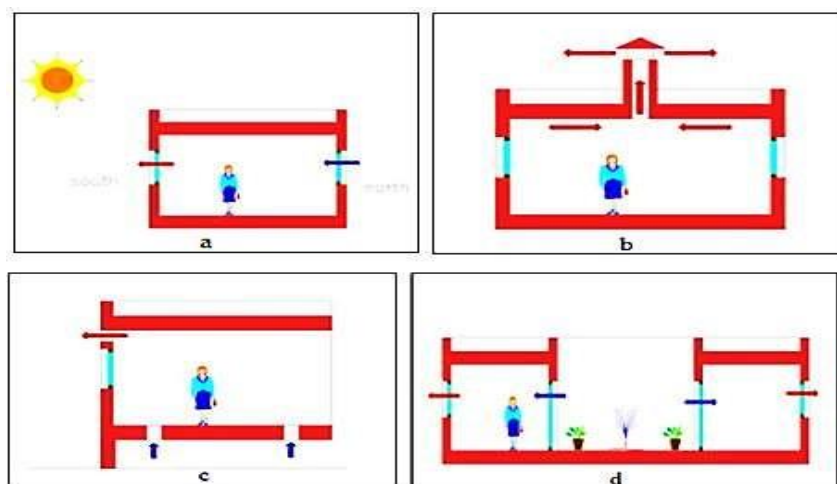


Figure III.4. Ventilation par refroidissement naturel et mécanique (Camara, 2018)

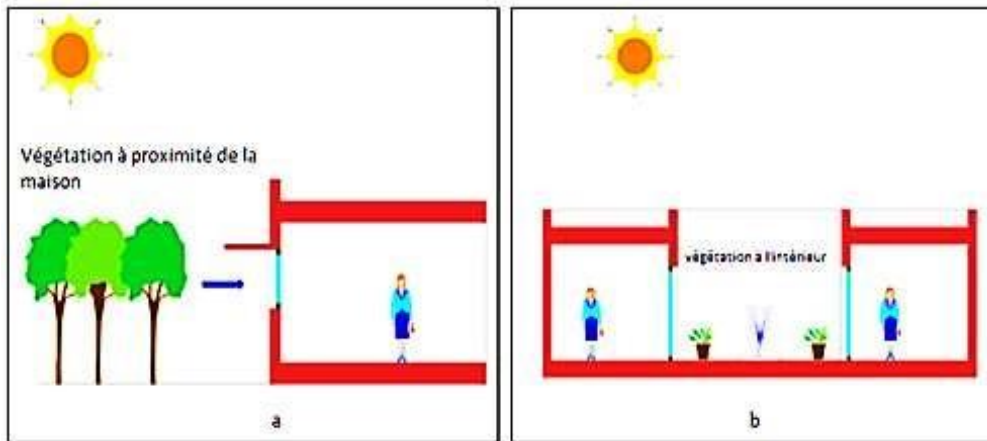


Figure III.5. Techniques d'humidification (Camara, 2018)

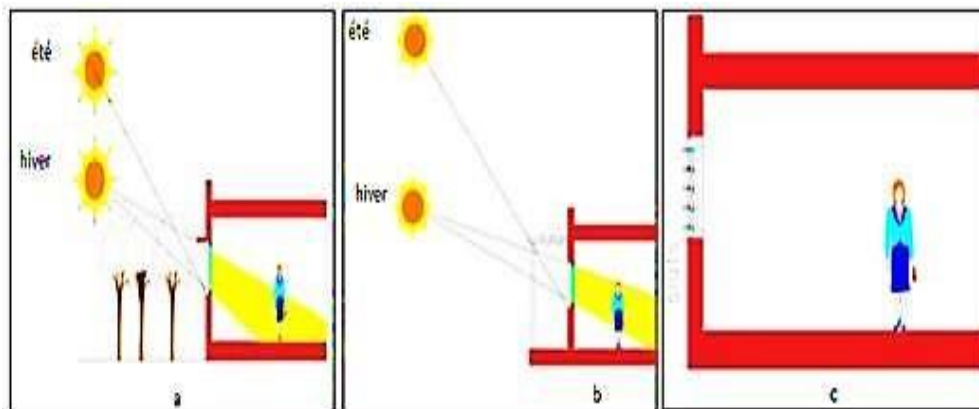


Figure III.6. Techniques de protection solaire (Camara, 2018)

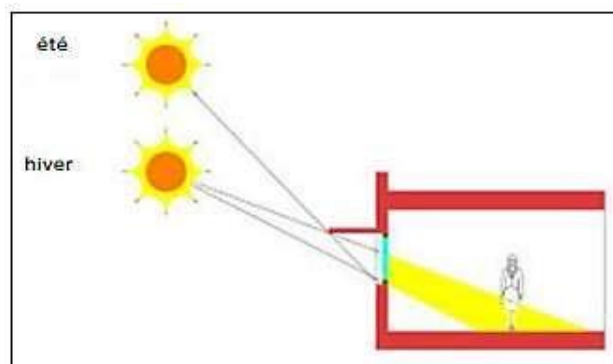


Figure III.7. Techniques de chauffage solaire passif (l'auvent en tant que solution de chauffage solaire passif) (Camara, 2018)

III.2.3.5 Échelle de performance des IPs

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).

A. Échelles de performance pour le critère « Orientation »

Indicateur : Orientation du bâtiment (OR)

Plus le bâtiment est bien orienté, il bénéficie des avantages d'éclairage et de chauffage ce qui contribue à la diminution de la consommation énergétique.

La norme algérienne (MHU, 2001) définit les prescriptions techniques relatives à la qualité d'orientation des bâtiments d'habitation à travers le territoire nationale. Nous avons développé une échelle adaptée pour évaluer de cet IP à partir de cette réglementation. L'évaluation de cet indicateur est qualitative et est représentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.6. Échelle de performance de l'indicateur (OR)

Orientation	Direction	littoral	Perf.	Hauts plateaux	Perf.	Saharien et présaharien	Perf.
Logement à double orientation	Nord-sud	favorable	0.9	favorable	0.9	T. favorable	1
	Est-ouest	favorable	0.9	T. favorable	1	Mauvaise	0.2
	S.E-N.O	favorable	0.9	favorable	0.9	Acceptable	0.5
	S.O-NE	T. favorable	1	T. favorable	1	favorable	0.9
	Nord et Est	médiocre	0.1	Mauvaise	0.2	Acceptable	0.5
	Sud et Est	favorable	0.9	favorable	0.9	favorable	0.9
	Sud-ouest	Acceptable	0.5	médiocre	0.1	médiocre	0.1
	N.E-S.E	T. favorable	1	T. favorable	1	T. favorable	1
	S.E-S.O	T. favorable	1	T. favorable	1	T. favorable	1
	S.O-NO	Mauvaise	0.2	Mauvaise	0.2	Mauvaise	0.2
N.O-NE	médiocre	0.1	médiocre	0.1	médiocre	0.1	
Logement à Simple orientation	nord	Mauvaise	0.2	Mauvaise	0.2	Acceptable	0.5
	est	médiocre	0.1	médiocre	0.1	favorable	0.9
	sud	T. favorable	1	favorable	0.9	favorable	0.9
	ouest	Mauvaise	0.2	Mauvaise	0.2	Mauvaise	0.2
	N.E	Mauvaise	0.2	médiocre	0.1	favorable	0.9
	S.E	favorable	0.9	T. favorable	1	favorable	0.9
	S.O	Acceptable	0.5	favorable	0.9	Mauvaise	0.2
N.O	Mauvaise	0.2	Mauvaise	0.2	Mauvaise	0.2	

Indicateur : Ratio de la façade orienté (RFO)

L'échelle de performance de cet indicateur est une évaluation qualitative et est représenté dans le tableau III.7 :

Tableau III.7. Échelle de performance de l'indicateur (FOR) (Kim, 2005)

Performance	P=1	P=0.8	P=0.3	P=0.1
RFO	≥80	≥70	≥60	<60

B. Échelles de performance pour le critère « Morphologie »

Indicateur : Nombre de niveaux (N_{étage})

À travers les travaux de Amirat et al. (2011) il existe une relation de concordance entre le nombre d'étages du bâtiment et les utilisations des énergies pour atteindre le confort thermique. A partir des résultats qu'ils ont obtenus, nous avons construit l'échelle de notation pour l'IP N_{étage} (Tableau III.8).

Tableau III.8. Échelle de performance de l'indicateur (N_{étage})

Performance	0.9	0.5	0.1
(N _{étage})	1-3	4-5	5>

Indicateur : Compacité du bâtiment (C_P)

D'un point de vue énergétique il faut favoriser des bâtiments les plus compacts possible (Boursas, 2013). La compacité d'un bâtiment est un élément important de l'implantation car elle influence fortement sur les déperditions thermiques. Plus le coefficient CF (Figure III.8) est faible, plus le bâtiment est compact (Rahmouni, 2020). L'échelle que nous proposons pour l'évaluation de cet indicateur est illustré par la Figure III.8.

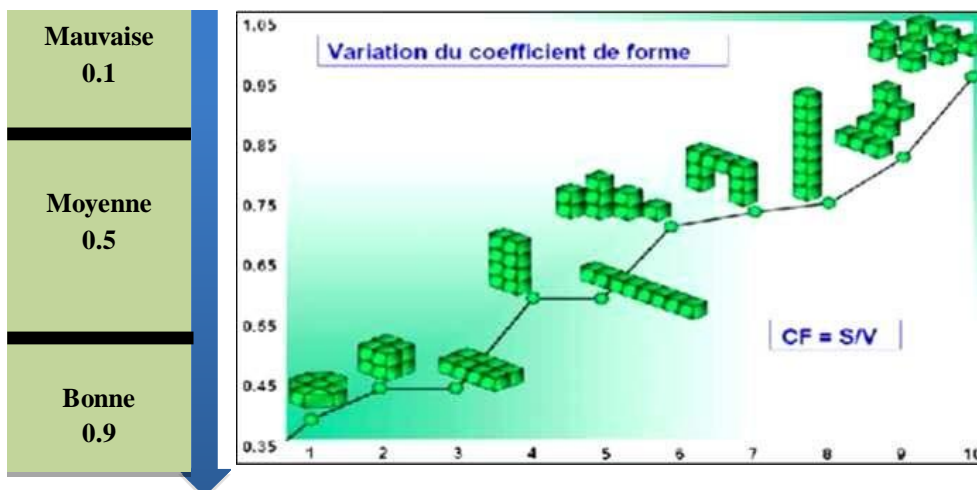


Figure III.8. Échelle de performance de l'indicateur (C_P)

C. Échelle de performance pour le critère « Couleur des parois »

La couleur des parois du bâtiment est un excellent indicateur pour évaluer la performance énergétique. L'échelle que nous proposons est basée sur les travaux de Mehira (2021) qui a

fixé le coefficient d'absorption d'énergie pour chaque couleur. Nous avons approfondi son idée et développé deux échelles pour évaluer la performance de cet IP couleur.

Concernant les parois intérieures, il serait préférable que le coefficient d'absorption serait plutôt du côté des couleurs claires pour limité l'absorption des rayonnements énergétiques. Pour les parois extérieures il serait préférable d'utiliser des couleurs avec un coefficient d'absorption moyen pour tenir compte du climat de l'Algérie (chaud en été et froid en hiver).

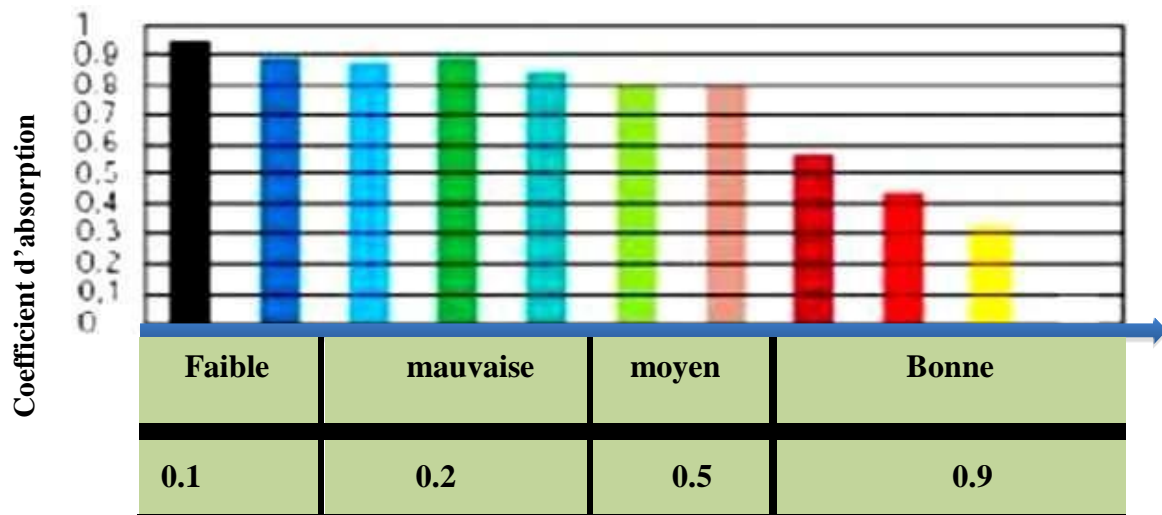


Figure III.9. Échelle de performance de l'indicateur (C_{int})

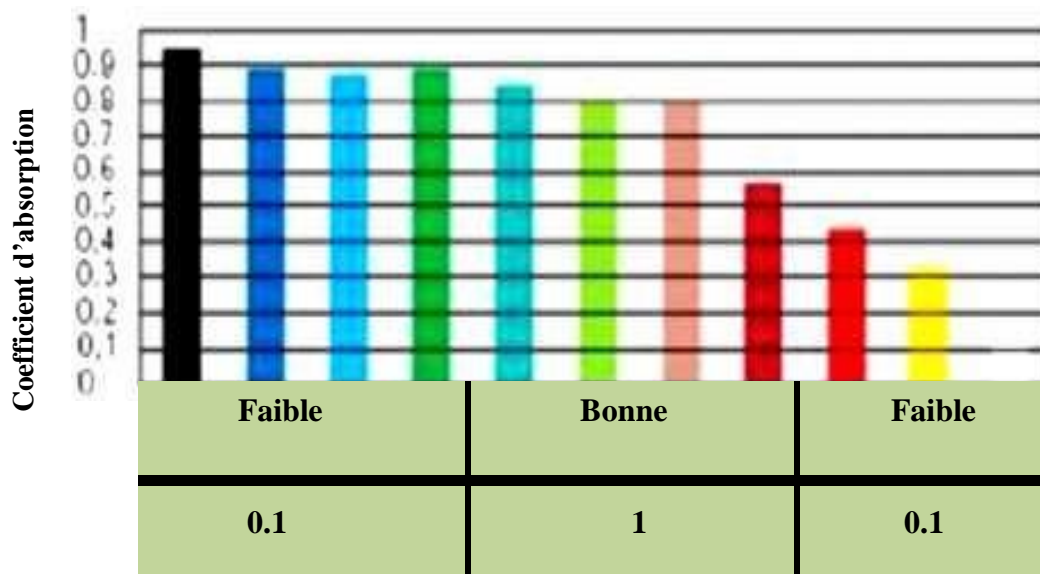


Figure III.10. Échelle de performance de l'indicateur (C_{ext})

Pour les couleurs orange, marron sombre, gris et violet la valeur de coefficient d'absorption et sont respectivement 0.4, 0.55, 0.75 et 0.68 (Mon habitat positif, 2022).

D. Échelles de performance pour le critère « Ouvertures »

Indicateur : Coefficient de gain de soleil (S_w)

Le coefficient S_w représente le **facteur solaire** de la fenêtre entière. Il s'agit de la capacité de la fenêtre à **redistribuer la chaleur du soleil**. Ce facteur solaire n'a pas d'unité de mesure, son coefficient est situé entre 0 et 1 (0 indique une fenêtre qui ne transmet pas la chaleur et 1 indique une fenêtre qui transmet l'intégralité de l'énergie du soleil). Une fenêtre avec un grand coefficient permettra ainsi à son propriétaire de **bénéficier de la chaleur gratuite** du soleil. Il n'aura donc pas ou peu besoin de chauffage quand la pièce sera illuminée et fera des économies d'énergie. Ce type de fenêtre est donc un grand atout pour l'hiver (Helleux, 2019). Sur la base de ce raisonnement, nous avons développé l'échelle d'évaluation ci-dessous pour cet indicateur (échelle quantitative).

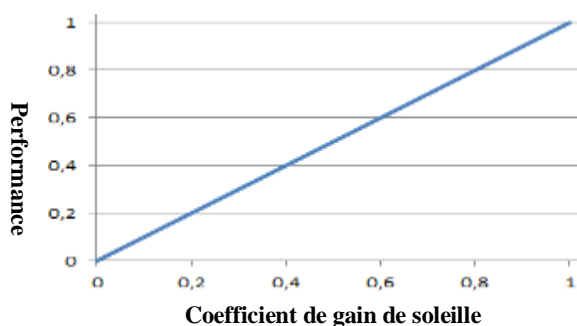


Figure III.11. Echelle de performance de l'indicateur (S_w)

Note : en été, une fenêtre avec un grand facteur solaire pourra être occultée par un volet, un store ou une brise-soleil pour conserver le frais dans le logement (Helleux, 2019).

Indicateur : Indice Window (U_w)

Le coefficient U_w (indice w pour "window") représente la conductivité thermique de la fenêtre dans son ensemble, avec le cadre (U_f) et le vitrage (U_g). Il est donc calculé en fonction de la performance thermique de ces deux indices.

Le coefficient U_w est exprimé en $W/m^2/K$, cela correspond à la quantité d'énergie (c'est-à-dire de chaleur ou de froid) que la fenêtre laisse passer. Ainsi, plus ce chiffre est bas, plus l'isolation est performante.

Sur le marché aujourd'hui, la plupart des fenêtres affichent un coefficient thermique entre 1 et 2 W/m^2K (Helleux, 2019).

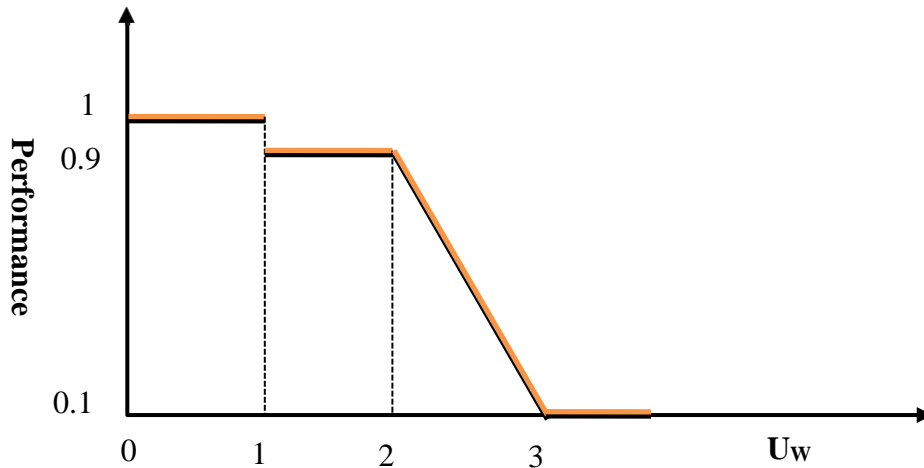


Figure III.12. Echelle de performance de l'indicateur (U_w)

Indicateur : Forme de fenêtre (FF)

Dans leurs travaux Mersal (2017) et Rahmouni (2020) ont montrés que la disposition des fenêtres ainsi que le sens des ouvertures de leurs volets influencent la consommation énergétique dans un bâtiment. Sur la base des résultats qu'ils ont obtenus, nous construisons l'échelle de performance de la Figure III.13.

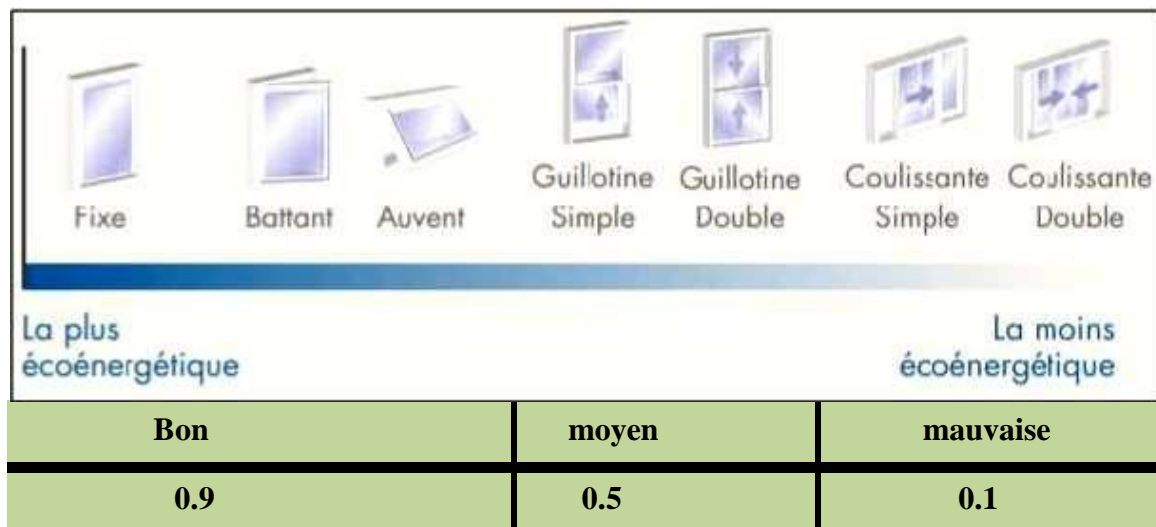


Figure III. 13. Echelle de performance de l'indicateur (FF)

E. Échelles de performance pour le critère « aspect architectural »

Indicateur : Distance entre les bâtiments (d_w)

Il existe une relation entre la distance entre les bâtiments et l'utilisation de l'éclairage naturel (Mehaoued, 2019). Pour s'assurer que chaque bâtiment est exposé au soleil il faut que le rapport entre la hauteur du bâtiment et la distance entre deux bâtiments soit égale à 1 ou plus. Plus ce rapport diminue moins l'énergie solaire sera utilisée et par conséquent cela affectera négativement l'efficacité énergétique du bâtiment.

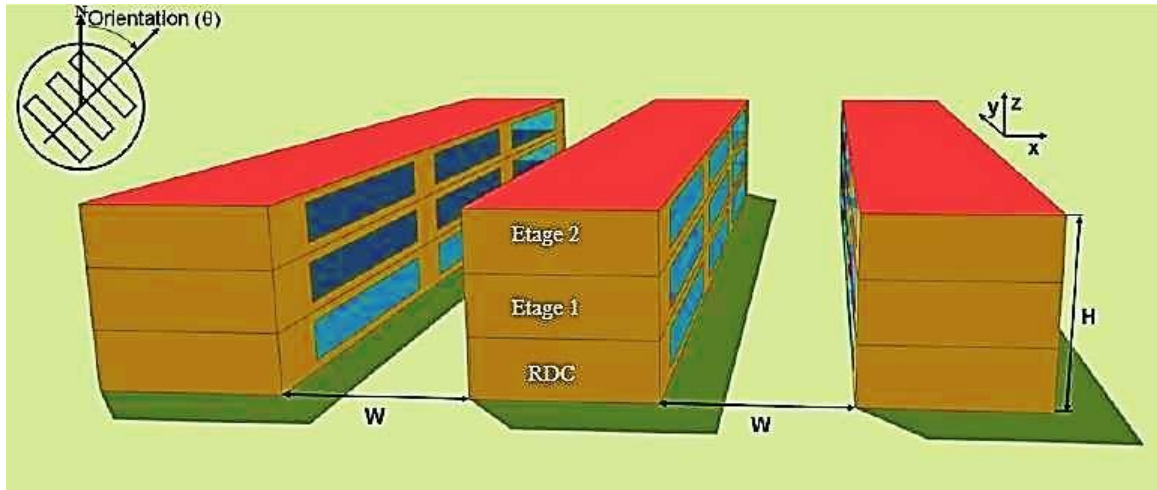


Figure III.14. Distance entre les bâtiments (Mehaoued, 2019)

Sur la base de ces résultats l'évaluation que nous proposons pour cet indicateur est qualitative comme suit :

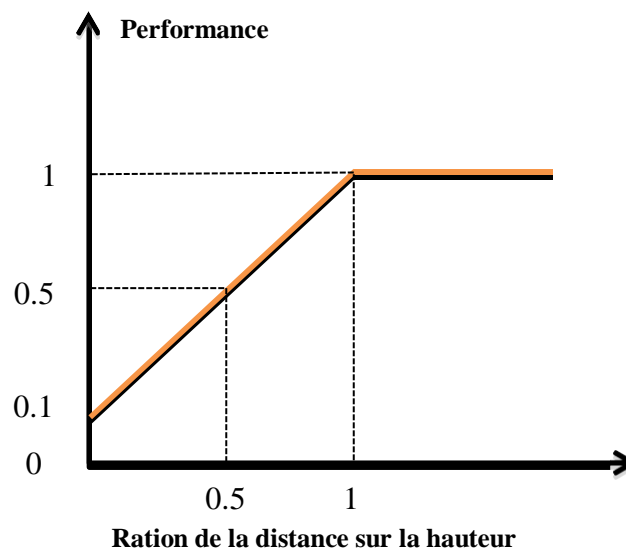


Figure III.15. Échelle de performance de l'indicateur (d_w)

Indicateurs : Ventilation naturelle (V_{nat}), Humidification (H_{umi}), Protection solaire (P_s) et Refroidissement (R_{efr})

L'évaluation de ces indicateurs est qualitative (échelle binaire) (Tableau III.9).

Tableau III.9. Échelle de performance de l'indicateur (V_{nat})

Performance	1	0
IP	Une des techniques de conception existe	Aucune technique n'est considérée

F. Échelles de performance pour le critère « Implantation »

Indicateur : Zone climatique (ZC)

Les résultats obtenus par [Ouahab \(2015\)](#) montrent que la zone climatique influence grandement la consommation des énergies dans le bâtiment. L'échelle de performance du Tableau III.10 tient compte de la sévérité du climat.

Tableau III.10. Échelle de performance de l'indicateur (ZC)

Performance	0.9	0.7	0.5	0.2	0.1
ZC	ZoneD₂	ZoneD₁	zoneC	zoneA	zoneB

Indicateur : Altitude (A_{lti})

Les besoins énergétiques primaires du bâtiment sont conditionnés par plusieurs facteurs. Parmi c'est facteur en trouve l'altitude ([Benoudjafer, 2018](#)). En effet, plus la hauteur est faible par rapport au niveau de la mer plus les besoins en énergie primaire du bâtiment sont faibles.

Tableau III.11. Échelle de performance de l'indicateur (A_{lti})

performance	0.9	0.5	0.1
Altitude	0 à 400m	400 à 800m	≥800m

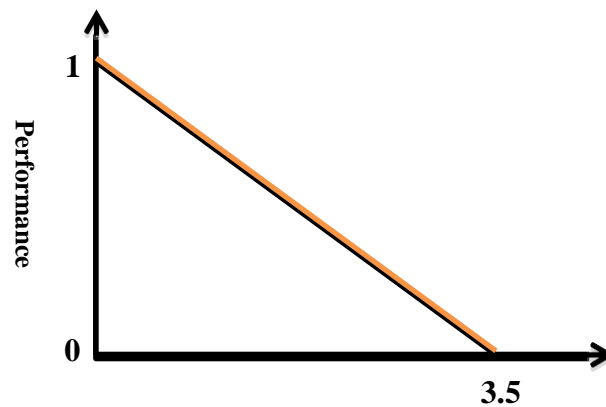
G. Échelles de performance pour le critère « Caractéristique physique des matériaux »

Indicateur : Conductivité thermique de milieu (λ)

La conductivité thermique des milieux est considérée comme l'une des propriétés physiques le plus importants des matériaux, notamment les matériaux qui construisent l'enveloppe du bâtiment. Plus la conductivité thermique est petite mieux l'isolation est.

Il n'est pas facile de construire une échelle exacte pour cet indicateur vue que cet indicateur vari d'un matériau à l'autre.

Nous avons développé l'échelle approximative en fixant une valeur de référence maximale de la conductivité des matériaux de construction les plus utilisés dans le bâtiment qui est le granit (λ=3.5) ([Bilans thermique, 2020](#)).



La conductivité thermique de milieu (λ) en
Figure III.16. Échelle de performance de l'indicateur (λ)

Indicateur : Diffusivité thermique (D)

La diffusivité thermique « D » d'un matériau caractérise sa vitesse de transmission des flux de chaleur d'une de ses parois à l'autre ou sa capacité à ralentir ce transfert de chaleur (Camara, 2018). Plus le nombre est petit meilleur est le produit (Ecobati, 2015). Nous avons assemblé les données et créé une échelle spéciale pour évaluer la diffusivité thermique des matériaux de construction.

$$D = \frac{\lambda}{\rho \times C}$$

- λ : conductivité thermique des milieux
- ρ : masse volumique
- C : capacité calorifique massique.

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

Tableau III.12. Échelle de performance de l'indicateur (D)

Diffusivité×10 ⁸ (m /s ²)	32≤	33 à 40	41 à 100	101 à 1000	>1000
performance	0.9	0.7	0.5	0.2	0.1

Indicateur : Effusivité thermique (E)

L'effusivité thermique « E » d'un matériau caractérise son aptitude à jouer un rôle d'éponge thermique c'est sa capacité à réguler l'ambiance intérieure. Plus l'effusivité est élevée plus le matériau est capable de réguler l'ambiance intérieure. Inversement, plus elle est faible et moins le matériau est en mesure d'assurer ce rôle (Camara, 2018). L'échelle que nous proposons est basé sur le résonnement suivant (ACT, 2017) :

$$E = \sqrt{\rho \times \lambda \times C}$$

Tableau III.13. Échelle de performance de l'indicateur (E)

Effusivité ($J/m^2S^{1/2}$)	≥ 2000	$1000 \leq E < 2000$	$100 \leq E < 1000$	$E < 100$
Performance	0.9	0.7	0.5	0.1

H. Échelles de performance pour le critère « Caractéristique Isolation »

Indicateur : Déperdition thermique (D_T)

Grace le (D.T.R.C 3-2) nous avons élaboré une échelle pour mesurer la performance de Déperdition thermique par transmission sachant que : $D_{TCALC} \leq 1.05 \times D_{Tréf}$

- D_{TCALC} : Déperdition thermique par transmission calculer ;
- $D_{Tréf}$: Déperdition thermique par transmission de référence.

Tableau III.14. Échelle de performance de l'indicateur (D_T)

Déperdition thermique par transmission	Condition vérifier	Condition non vérifier
Performance	1	0.1

Indicateur : Utilisation d'un isolant (UT_{iso})

L'évaluation de cet indicateur est qualitative (échelle binaire) selon le tableau suivant :










Tableau III.15. Échelle de performance de l'indicateur (UT_{iso})

Utilisation d'un isolant	Oui	Non
Performance	1	0

Indicateur : la nature de l'isolant utilisée (N_{iso})

Le type d'isolation utilisé dans la construction est un bon indicateur fiable pour évaluer la performance énergétique du bâtiment. Et à travers un site ([tout sur l'isolant ,2019](#)) nous avons classé l'isolant à baser sur sa capacité à isoler (à travers la conductivité thermique de chaque isolant).

Tableau III. 16. Échelle de performance de l'indicateur (N_{iso})

Isolateur									
	Fibre de bois	Laine de chanvre	Laine de lin	Laine de mouton	Laine de roche	Laine de verre	Ouate de cellulose	Polystyrène	Polyuréthane
P	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

I. Échelles de performance pour le critère « Consommation des énergies fossiles »

Indicateur : Consommation d'électricité (ELE) et (GAZ)

En raison du manque des données nécessaires à la construction d'une échelle d'évaluation de la performance de l'indice de consommation énergétique des bâtiments en Algérie. Nous avons développé une échelle approximative à partir des étiquettes énergétiques européenne. Il est vrai que cette échelle ne reflète pas fidèlement la situation algérienne, néanmoins, et vu la proximité géographique, la similarité du climat et le rapprochement des modes de construction l'utilisation d'une telle étiquette peut être toléré.

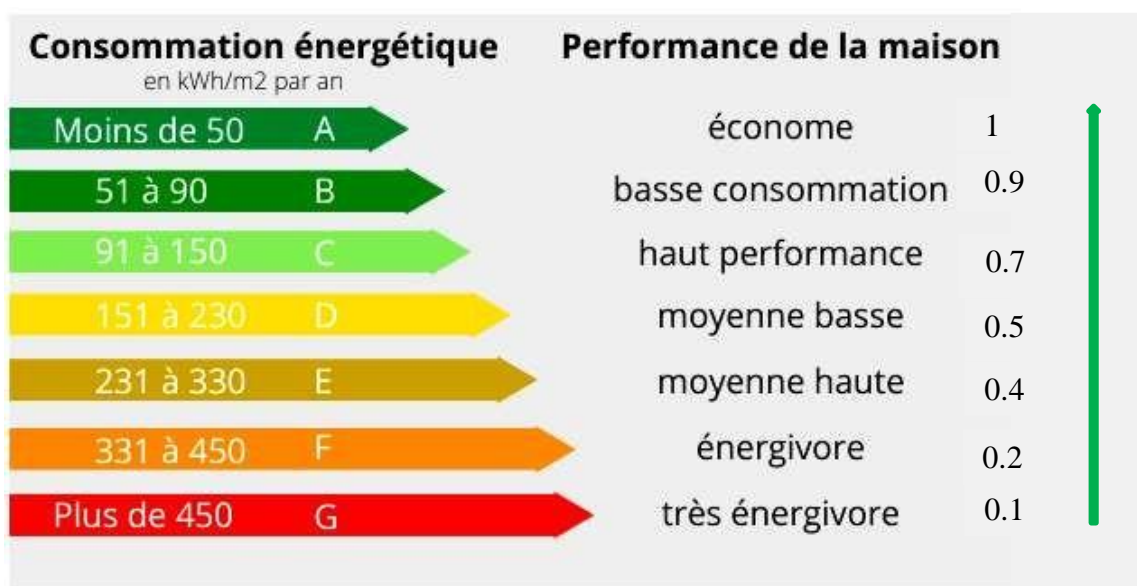


Figure III.17. Échelle de performance de l'indicateur (ELE)

J. Échelles de performance pour le critère « Consommation d'énergie renouvelable »

Indicateur : Intégration (Inté_{ER})

Tableau III.17. Échelle de performance de l'indicateur (Inté_{ER})

Inté _{ER}	Oui	Non
Performance	1	0

Indicateur : Ratio de consommation (R_{R/F})

L'utilisation des énergies renouvelables dans les bâtiments est l'un des IP les plus de l'efficacité énergétique. En effet, l'intégration des énergies renouvelables réduit les émissions des GES et lutte contre l'épuisement des sources d'énergie fossiles. L'échelle d'évaluation est représentée dans le Tableau III.18.

Tableau III.18. Échelle de performance de l'indicateur ($R_{R/F}$)

E_R/E_F	$EF \approx 0$	$\frac{ER}{EF} = 1$	$\frac{ER}{EF} = 0.5$	$\frac{ER}{EF} = 0$ Avec $EF \neq 0$
Performance	0.9	0.7	0.5	0.1

K. Échelles de performance pour le critère « Ambiances intérieurs »

Indicateurs : Humidité intérieure (H) et Température intérieure du bâtiment (T)

Ces deux IPs sont très utilisés pour les évaluations des performances énergétiques des bâtiments à travers le monde. En effet, régler les appareils de chauffage et de climatisation aux températures de confort permet et d'assurer un bon confort des ambiances intérieures sans pour autant gaspiller de l'énergie. Les échelles de performance sont ci-dessous :

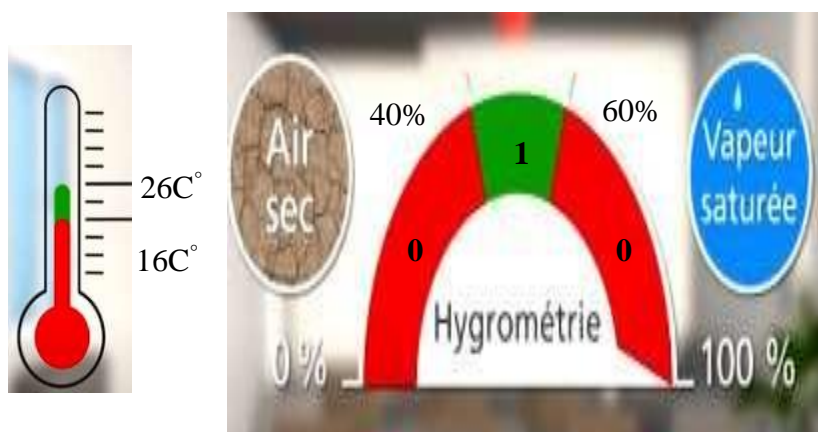


Figure III.18 . Échelle de performance de l'indicateur (H)

Tableau III.19. Échelle de performance de l'indicateur (T)

Température	Température mesurée à l'intérieur (16 à 26 C°)	Autre
Performance	1	0.1

Indicateur : Eclairage intérieur (EC_{int})

L'éclairage est une condition préalable pour le bâtiment, mais la quantité d'éclairage dans celui-ci doit être dans des limites raisonnables, comme l'augmentation du besoin affecte négativement la performance énergétique du bâtiment.

Nous avons développé une échelle pour évaluer la performance de cet indice de quantité d'éclairage intérieur, en mesurant la quantité d'éclairage nécessaire pour chaque partie du bâtiment ainsi que pour l'ensemble du bâtiment (Silamp, 2021).

On a la quantité de l'éclairage intérieur de référence ; avec : $R_{lampLED}=0.8$ (conçédèrent comme une valeur de référence) :

$$\phi_{\text{réf}} = S_{\text{pièce}} \times N_{\text{luxe}} \times \left(\frac{1}{R_{\text{lemp}}}\right) \times \left(\frac{1}{\text{fac réflexion}}\right)$$

Pour calculer le rendement de n'importe qu'elle lampe il faut diviser la quantité de lumen produit par celle-ci sur la consommation de l'électricité. Plus sa valeur est élevée, plus la source lumineuse se montre performante dans sa fonction d'éclairage (Silamp, 2021).

$$\text{Rendement lumineux} = (\text{flux lumineux} / \text{consommation électrique}) \times \frac{1}{100}$$

Tableau III.20. Nombre de luxe

Parties de bâtiment	Salle à manger	Chambre d'adulte	Chambre d'adulte	Chambre d'enfant	Salle de bureau	Salle de bains	zones de passage (escalier, couloir et entrée)
Nombre de lux	200	200	300	300	300	300	100 à 200

Les facteurs de réflexion sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.21. Facteurs de réflexion

Peinture	Valeur du facteur de réflexion
Blanc	0.7
Vert	0.35
Bleu	0.2
Rouge	0.2
Gris clair	0.5
Gris ardoise	0.1
Noire	0.04
Jaune	0.5
Matériaux	Valeur du facteur de réflexion
Plâtre	0.85
Brique blanche	0.62
Brique rouge	0.2
Carrelage	0.3
Béton	0.4
Pierre de taille	0.5
Aluminium poli	0.65
Bois clair	0.4

Donc : si $\phi_{\text{réf}} \geq \phi_{\text{calc}} \leftrightarrow \text{performance} = 1$. Sinon la performance = 0.1.

- $\phi_{\text{réf}}$: quantité de l'éclairage intérieur de référence ;
- ϕ_{calc} : quantité de l'éclairage intérieur calculé ;
- $S_{\text{pièce}}$: superficie de la pièce ;
- N_{luxe} : nombre de luxe (voir le Tableau III.20) ;
- R_{lemp} : Rendement lumineux ;

- Fac réflexion : Facture de réflexion (voir le tableau III.21).

Ainsi, la performance de chaque partie du bâtiment est donnée par le tableau III.22.

Tableau III.22. Échelle de performance de l'indicateur (ϕ)

Parties de bâtiment	Salle à manger	Chambre d'adulte	Chambre d'adulte	Chambre d'enfant	Salle de bureau	Salle de bains	zones de passage (escalier, couloir et entrée)
Performance	1 ; 0.1	1 ; 0.1	1 ; 0.1	1 ; 0.1	1 ; 0.1	1 ; 0.1	1 ; 0.1

Enfin, il suffit de calculer la moyenne pour déterminer la performance de l'éclairage globale du bâtiment par la forme suivante : $PR \phi_{calc \text{ moyen}} = \sum_{i=1}^n \frac{PR\phi_{calc(i)}}{n}$

- $PR \phi_{calc \text{ moyen}}$: performance de quantité d'éclairage moyen de bâtiment ;
- $PR\phi_{calc(i)}$: performance de quantité d'éclairage pour chaque pièce de bâtiment.

L. Échelle de performance pour le critère Caractéristique Efficacité énergétique des équipements

Indicateur : Classe énergétique des équipements(CEE)

Parmi les méthodes d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, l'utilisation d'appareils électroménagers moins énergivores. Dans les pays développés il existe des taxes sur les appareils utilisés dans les bâtiments, plus leur consommation d'énergie est faible moins ces taxes sont payées. Par conséquent cet IP est considérée comme l'un des indicateurs les plus importants sur lesquels le décideur peut s'appuyer pour évaluer la performance énergétique des bâtiments. L'échelle proposée est représentée dans la Figure III.19.

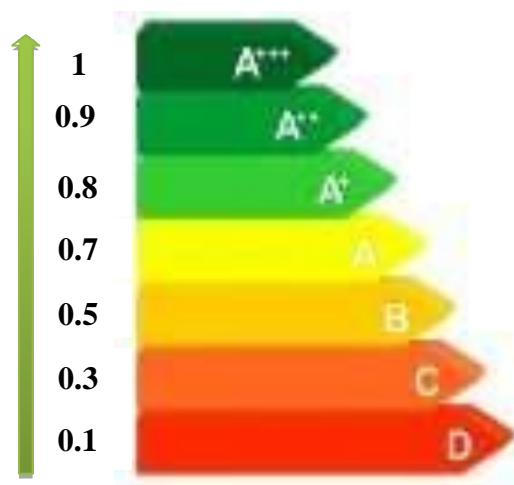


Figure III.19. Échelle de performance de l'indicateur (CEE)

Indicateur : Systèmes de chauffage et refroidissement à base d'ER (SYS)

Nous proposons une évaluation binaire comme suit :

Tableau III.23. Échelle de performance de l'indicateur (S_{YS})

SYS	Existe	Non
Performance	1	0

M. Échelle de performance pour le critère « Usage des énergies »

Indicateur : Utilisation des nouvelles technologies (UT_{ntech}) et Utilisation d'un manuel d'aide à l'usage (UT_{mdl})

Nous proposons une évaluation binaire comme suit :

Tableau III.24. Échelle de performance de l'indicateur (UT_{ntech}).

SYS	Existe	Non
Performance	1	0

N. Échelle de performance pour le critère « Pollution »

Indicateur : émission du CO_2 à partir de la consommation des énergies (ECO_2)

Parmi les éléments qui détruisent l'écosystème figurent les émissions des gaz à effet de serre en particulier le dioxyde de carbone. Ainsi les émissions de carbone peuvent être considérées comme l'un indicateur d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments les plus importants.

Comme pour l'IP « Consommation des énergies fossiles » Nous avons utilisé les étiquettes européennes pour l'évaluation de cet IP.

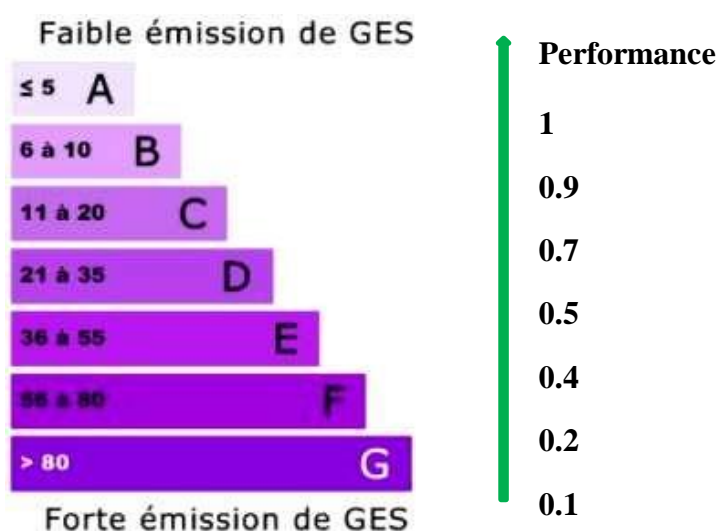


Figure III.20. Échelle de performance de l'indicateur (ECO_2)

Indicateur : utilisation des matériaux respectivement l'environnement (UT_{mri})

Nous proposons une évaluation binaire comme suit :

Tableau III.25. Échelle de performance de l'indicateur (UT_{mri})

UT_{mri}	Oui	Non
Performance	1	0

III.2.4 Approche ascendante – "Bottom-up" : Agrégation multicritères

À l'inverse de la procédure précédente, cette approche nécessite un niveau détaillé d'informations. Elle consiste, à partir de l'échelle d'information la plus fine, à « remonter » vers des échelles supérieures afin de manipuler des indicateurs globaux plus synthétiques (Thorel, 2006).

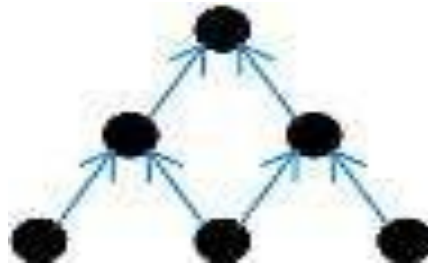


Figure III. 21. Schéma illustrant les principes de modélisation Bottom-up (Thorel, 2006)

III.2.4.1 Méthodes d'agrégation des performances

D'après Ben Mena (2000) Les méthodes d'agrégation fréquemment utilisées sont :

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

L'agrégation des indicateurs nécessite une grande clarté et une simplicité de réalisation, c'est pourquoi nous avons opté pour une agrégation complète

III.2.4.2 Méthode d'agrégation complète

Pour obtenir une note par indicateur, il s'agit maintenant d'agréger l'ensemble des critères associés à l'indicateur. D'après la littérature (Roy et Bouyssou, 1993 ; Maystre et al., 1994), notre problématique correspond à l'agrégation complète ou *approche du critère unique de synthèse* ; c'est-à-dire l'inclusion de l'ensemble des données dans une formule mathématique en vue de l'obtention d'une valeur unique. Cela suppose de choisir quels poids attribuer à chaque donnée, comment combiner ces critères en un indicateur (par une somme, un produit ou une opération plus complexe).

Dans notre cas, cette approche (ascendante) est basée sur une agrégation multicritère et évalue les performances en utilisant la méthode de la somme pondérée (MSP). Les poids des indicateurs seront calculés en utilisant la méthode AHP (Analytic Hierarchic Process).

III.2.4.3 Méthode de la Somme Pondérée (MSP)

La somme pondérée offre l'avantage de la clarté et de la simplicité d'utilisation. Cette dernière consiste à attribuer une note de performance à chaque indicateur PI_i , qui sera multipliée par un coefficient de pondération w_i . La somme sur (n) indicateurs donne un résultat de performance agrégé, exprimé par l'équation :

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

- PC_j : valeur de performance pour le critère C_j
- PI_i : 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

Cette valeur sera bornée entre 0 et 1 étant donné que l'ensemble des critères et des poids sont positifs et inférieurs ou égaux à 1.

III.2.4.4 Méthode Analytic Hierarchic Process (AHP)

A. 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 subdivisées 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.

B. 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.26. 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 :

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

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 $W = \{w_1 \dots w_2 \dots w_n\}$. 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 :

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

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 :

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

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

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.27 . 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.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthodologie développée et proposée pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments d'habitation dans le contexte algérien. Pour cela, nous avons retenus deux approches complémentaires que nous avons définis puis détaillé. A l'issue de la première approche, nous avons construit un tableau de bord contenant les différents paramètres d'évaluation. Par la suite, nous avons associé à chaque IP une méthode de calcul et une échelle de performance permettant son évaluation. Dans un deuxième lieu, nous avons défini le processus d'agrégation multicritère adopté ainsi que les méthodes retenues.

Afin de démontrer la méthodologie développée et la base de données collectée, une application de la méthodologie sur des cas réels de bâtiments d'habitation dans la région de Bouira fera l'objet du chapitre IV.

Chapitre 04

**Validation de la
méthodologie développée –
Etude de cas**

IV.1 Introduction

A l'issue du travail mené jusqu'à maintenant, nous confrontons dans ce chapitre la méthodologie développée à deux cas réels de bâtiment d'habitation que nous avons choisi dans les communes de Ine-Turek et Bouira ce, en fonction des données statistiques disponibles.

Nous commencerons dans un premier lieu par une présentation du cas d'étude. Ensuite, et à l'aide des méthodes de calcul et des échelles de performance développées dans le troisième chapitre, nous calculerons puis évaluerons les performances de chaque IPs. Puis, vient la pondération des différents paramètres de l'évaluation de la performance énergétique (objectifs, critères et IPs) en utilisant la méthode AHP. Enfin, nous terminerons par une agrégation des performances dans le but d'évaluer la performance énergétique (l'efficacité énergétique) de nos cas d'étude. Les résultats obtenus seront aussi présentés puis discutés et argumentés dans ce chapitre.

Nous avons programmé sur Visual Basic un outil informatique dans le but d'améliorer l'utilisation de la méthodologie développée ainsi que la base de données collectée.

IV.2 Présentation des cas d'études

Nous avons choisi deux cas d'études (deux bâtiments d'habitation) différents. Le premier est une maison individuelle et le deuxième est un bâtiment collectif.

IV.2.1 Cas d'étude n°01 : Maison individuelle

Le premier cas d'étude est une maison individuelle localisée à la commune de Ine-Turek. Les informations relatives à ce premier cas d'étude sont résumées dans le Tableau IV.1 ainsi que dans les Figures IV.1 à IV.5.

Tableau IV.1. Présentation du cas d'étude n°01 (Maison individuelle)

Bâtiment 01	Informations
Nombre de niveaux	Rez-de-chaussée
hauteur sans acrotère	3.06 m
Hauteur avec acrotère	3.86 m
La surface habitable	96.6 m ²
Implantation	Village ZABOUDJA commun INE Turek (zone climat C)



Figure IV.1. Façade principale du bâtiment 01

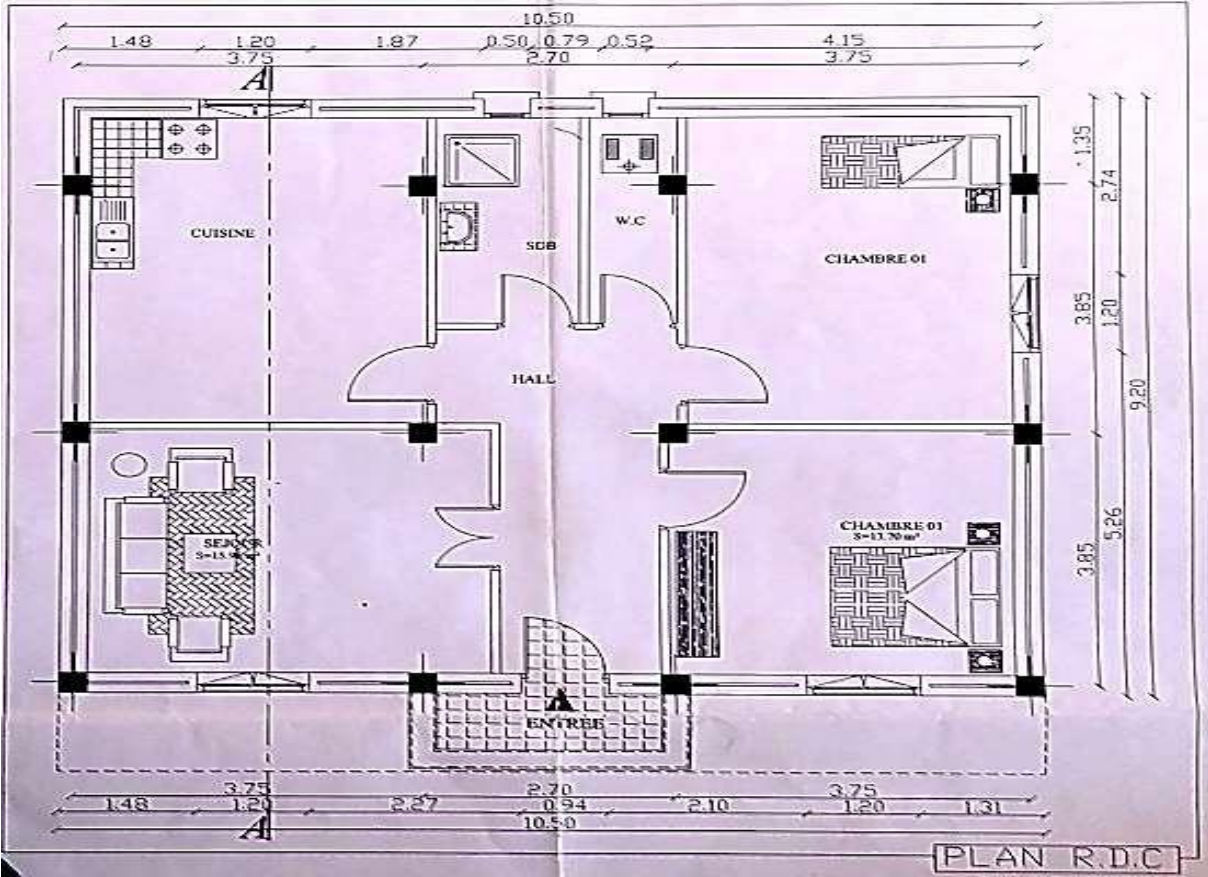


Figure IV.2. Plan du Rez-de-chaussée du bâtiment 01

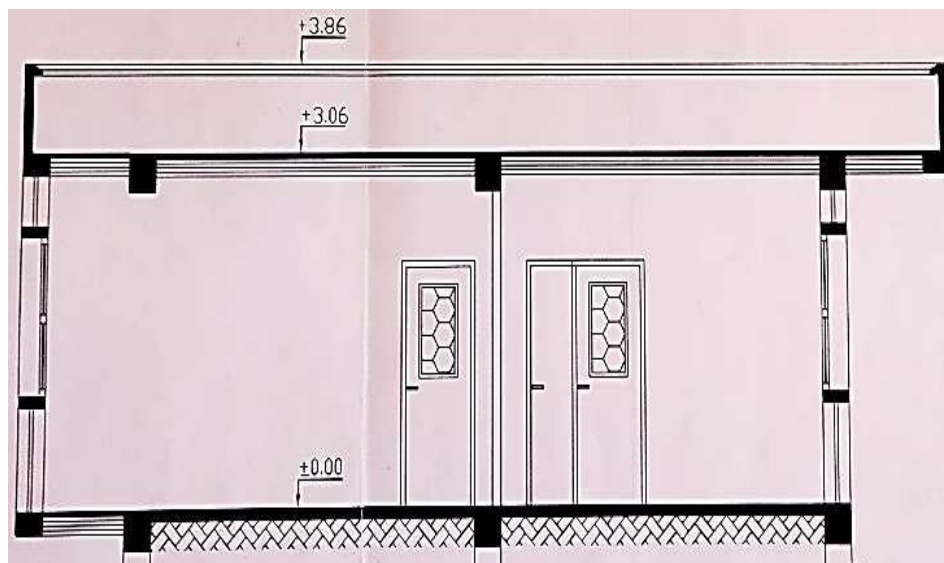


Figure IV.3. Coupe A-A du bâtiment 01



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

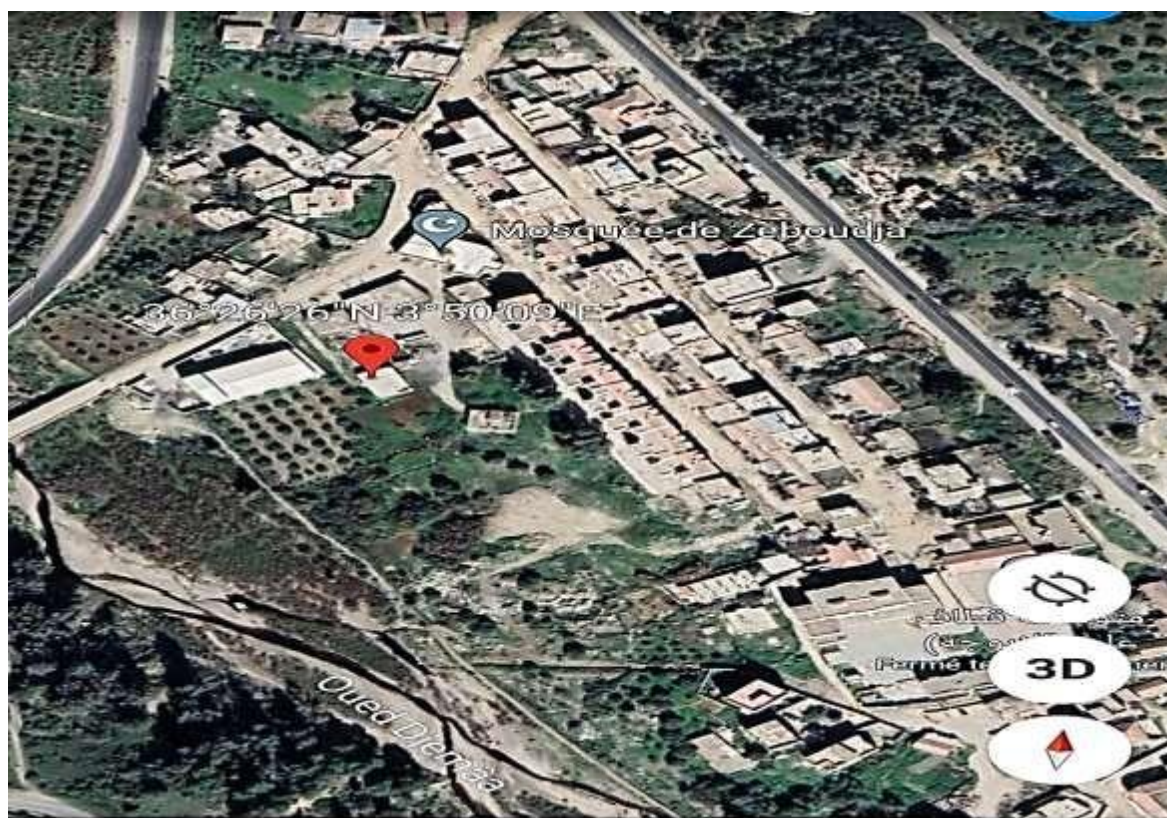


Figure IV.5. Localisation du cas d'étude n°01 (Source : Google Earth)

IV.2.2 Cas d'étude n°02 : Bâtiment collectif

Le deuxième cas d'étude est un bâtiment à usage d'habitation (y compris le rez-de-chaussée) localisée à la commune de Bouira en raison de la disponibilité des données nécessaires à l'étude (factures de consommation énergétique, plans, etc.). Les informations relatives à ce cas d'étude sont résumées dans le Tableau IV.2 ainsi que dans les Figures IV.6 et IV.7.

Tableau IV.2. Présentation du cas d'étude n°02 (Bâtiment collectif)

Bâtiment	Informations
Gabarit	radez chaussé+5
hauteur sans acrotère	18.36 m
Hauteur avec acrotère	18.96 m
Surface bâtie du terrain	363.78m ²
Surface totale des planchers	2370.78
Surface de terrain	1243.52 m ²
Nature juridique du terrain	Terrain Agricole
Morphologie de terrain	En pente
Implantation	Bal mahdi commun Bouira (Zone climat C)



Figure IV.6. Façade principale du bâtiment 02

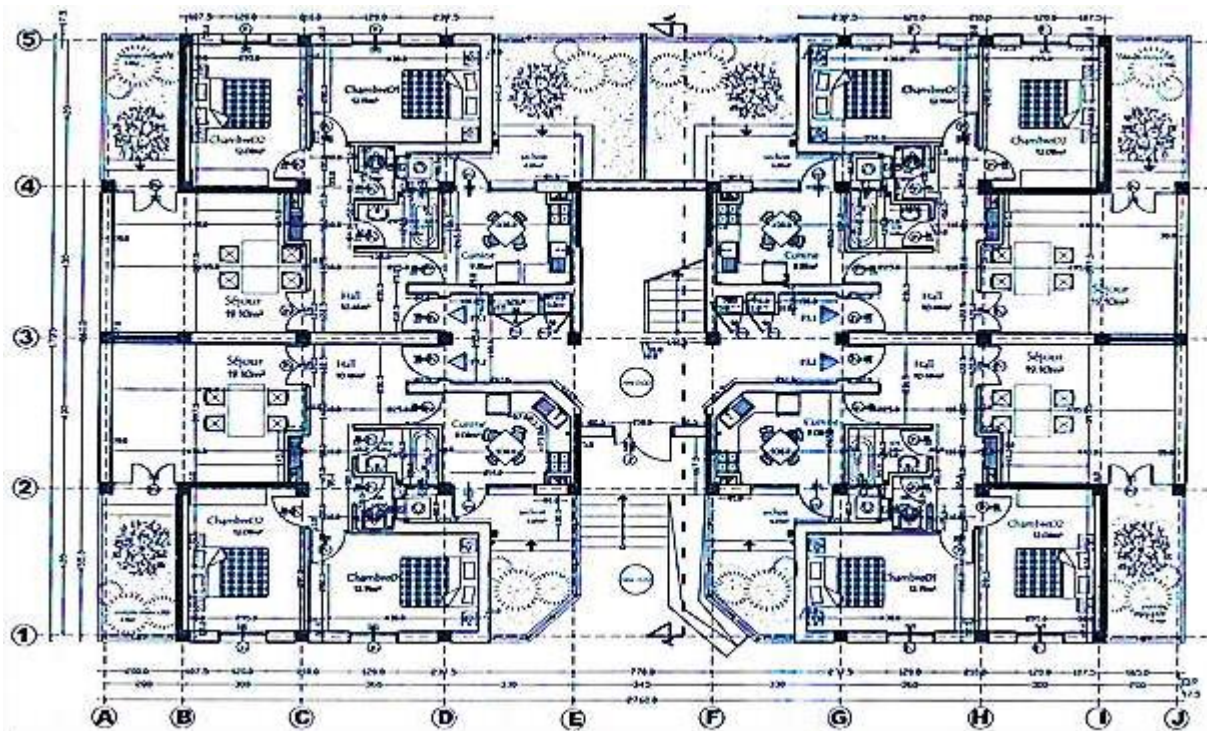


Figure IV.7. Plan du Rez-de-chaussée du bâtiment 02

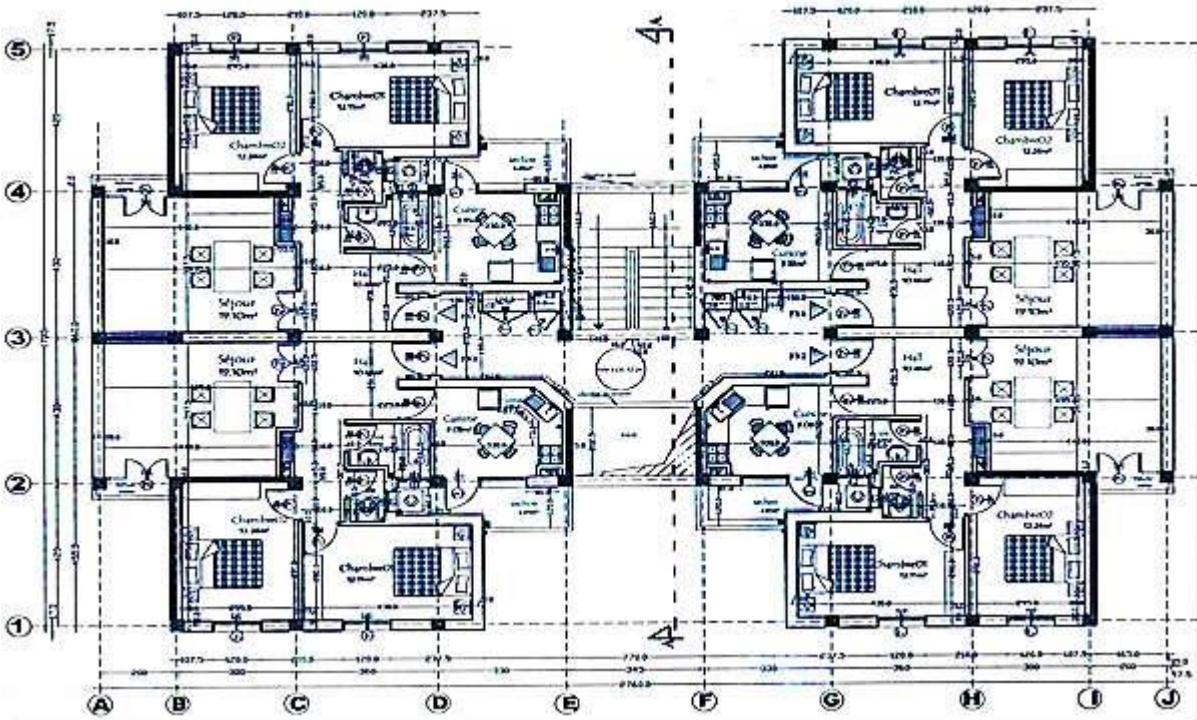


Figure IV.8. Plan étage courant du bâtiment 02



Figure IV.9. Photos prises sur le site du premier cas d'étude



Figure IV.10. Localisation du cas d'étude n°02 (Source : Google Earth)

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.3. Calcul des des IPs du cas d'étude n°01

Critère	Indicateur	Calcul
Orientation	Orientation de bâtiment (OR)	On a la maison à double orientation : Nord – Est $\Rightarrow P=0.2$ et Sud- Ouest $\Rightarrow P=0.1$. Donc : $P_{OR\ moyen} = \frac{0.2+0.1}{2} = 0.15$
	Ratio de la façade orienté (FOR)	$FOR = \frac{10.5 \times 2 \times 3.06}{(10.5+9.2) \times 2 \times 3.06} = 0.5329 \Rightarrow P=0.5$
Morphologie	Nombre des niveaux (N _{étage})	$N_{étage} = 1 \Rightarrow P=0.9$
	Compacité (C _p)	$C_p = \frac{(10.5 \times 9.2) + 3.86 \times 2 \times (10.5+9.2)}{10.5 \times 8.2 \times 3.86} = 0.748 \Rightarrow P=0.5$

Tableau IV.4. Calcul des des IPs as d'étude n°01 (Suite)

Critère	Indicateur	Calcul		
		Pièce	Couleur	Performance
Couleur des parois	Couleur des parois intérieur (C _{int})	Cousine	Vert pistache	0.5
		Salle amanger	Vert pistache	0.5
		Chambre 1	Marron foncé	0.5
		Chambre 2	Marron foncé	0.5
		Hall	Blanc	0.9
		Salle de bain	Blanc	0.9
		Cage d'escalier	Blanc	0.9
	Total	$\frac{(0.5 \times 4) + (0.9 \times 3)}{7}$		0.6714
	Couleur des parois (C _{ext})	La couleur de la façade extérieur est « rouge brique » Donc : P=1		
Ouvertures	Coefficient de gain de solier (S _w)	La fiche technique de la menuiserie et de la vitrerie des fenêtres indique que le coefficient de gain de soleil : S _w =0.5. Donc P=0.5		
	Indice Window (U _w)	La fiche technique de la menuiserie et de la vitrerie des fenêtres indique que l'indice Window U _w =2w/m ² .K. Donc P=0.9		
	Forme des fenêtres (FF)	Les ouvertures vers l'extérieur sont : 4 fenêtres doubles coulissantes et 2 fenêtres auvent Donc $P_{FF\text{ moyen}} = \frac{(4 \times 0.1) + (2 \times 0.9)}{6} = \mathbf{0.3666}$		
Aspect architectural	Distance entre les bâtiments (d _w)	Il n'y pas d'édifice adjacent pour la maison à étudier. Donc $\frac{w}{H} > 1 \Rightarrow \mathbf{P=0.9}$		
	Ventilation naturelle (V _{nat})	Aucune technique de ventilation naturelle n'est utilisée dans la conception de la maison $\Rightarrow \mathbf{P=0}$		
	Humidification (H _{umi})	La conception du bâtiment vérifie la technique (a) de la Figure III.5 $\Rightarrow \mathbf{P=1}$		
	Protection solaire (P _s)	Aussi, pour cet IP, la conception du bâtiment vérifie la technique (c) de la Figure III.6 $\Rightarrow \mathbf{P=1}$		
	Chauffage solaire passif (CH _{auff})	La technique du chauffage solaire passif a été bien prise en considération lors de la conception du bâtiment (Figure III.7) $\Rightarrow \mathbf{P=1}$		
Implantation	Zone climatique (ZC)	Le bâtiment 01 est implanté à Zeboudja, commune de INE Turek, Bouira \Rightarrow Zone C $\Rightarrow \mathbf{P=0.5}$		
	Altitude (A _{ti})	A _{LTU} = 342 m (zaboudja) $\Rightarrow \mathbf{P=0.9}$		
Caractéristique physique des matériaux de l'enveloppe	Conductivité thermique (λ)	Le détail des calculs est montré dans la section IV.3.1.1		
	l'effusivité thermique (E)			
	diffusivité thermique (D)			

Tableau IV.108. Calcul des des IPs du cas d'étude n°01

Critère	Indicateur	Calcul				
Isolation	Utilisation d'un isolant (UT_{iso})	Aucun isolant n'est utilisé \Rightarrow P=0				
	Nature d'isolant (N_{iso})	Aucun isolant n'est utilisé \Rightarrow P=0				
	Déperditions thermiques par transmission (D_T)	Le détail des calculs est montré dans la section IV.3.1.2				
consommation d'énergie fossile	Electricité (ELE)		Electricité (KWh)	Gaz (Th)	Données (année 2021)	
		Cons. 1 ^{er} trimestre	602.00	9362.70		
		Cons. 2 ^{ème} trimestre	554.00	6730.02		
		Cons. 3 ^{ème} trimestre	660.00	936.00		
		Cons. 4 ^{ème} trimestre	808.00	2549.00		
		$S_1+S_2+S_3+S_4$	2624.00	19577.72		
	Gaz	Total cons. (KWh/an)	2624.00	22768.8884		
		Cons. de référence / surface habitable (KWh/m ² /an)	27.1635	235.7027		
		Total cons. (KWh/m ² /an)	262.8662			
		Classe énergétique de la maison	Classe E			
Valeur de la performance	P=0.4					
Consommation d'énergie renouvelable	Intégration des ER (Int_{ER})	Le bâtiment carbure au fossile. Aucune énergie renouvelable n'est utilisée \Rightarrow P=0				
	Ratio de la consommation des ER ($R_{R/F}$)	Comme l'énergie renouvelable n'est pas utilisée \Rightarrow P=0				
Efficacité énergétique des équipements	Classe énergétique des équipements (CEE)	Équipement	Classe	Performance		
		Climatiseur	A ⁺⁺	0.9		
		Télévision	A ⁺⁺	0.9		
		Chauffage	A	0.7		
		Réfrigérateur	A ⁺⁺	0.9		
		Lampes (LED)	A ⁺⁺	0.9		
	$P_{\dots\dots} = \frac{0.9+0.9+0.7+0.9+0.9}{5}$	0.86				
Système de chauffage et de refroidissement à base d'énergie renouvelable (S_{YS})	Aucun système de chauffage et/ou de refroidissement intégrant les ER n'est utilisé \Rightarrow P=0					
Usage des énergies	Utilisation des nouvelles technologies (UT_{ntech})	Puisque toutes les lampes sont à basse consommation énergétique (LED), nous pouvons dire que les nouvelles technologies de réduction de la consommation des énergies sont utilisées \Rightarrow P=1				
	Utilisation d'un manuel d'aide à l'usage (UT_{mdl})	Aucun manuel d'aide à l'usage mis à la disposition des usagers \Rightarrow P=0				

Tableau IV.6. Calcul des des IPs du cas d'étude n°01 (Suite)

Critère	Indicateur	Calcul		
Pollution	Utilisation de matériaux respectueux de l'environnement	Les matériaux utilisés sont des matériaux de l'industrie minière, des carrières, de cimenteries, etc. Les matériaux respectueux de l'environnement ne sont pas une politique de la construction algérienne ⇒ P=0		
	Emission des gaz à effet de serre (CO ₂)	$CO_2 = (CE \times) + (CG \times f_c)$ $= (27.1635 \times 0.383) + (235.702 \times 0.20191)$ ⇒ $CO_2 = 57.9943$ (Kg .CO ₂ -e/m ² /an) ⇒ Classe F ⇒ P=0.2		
		Combustible	Facteur d'émission	Référence
		Electricité	0.383 (KgCO ₂ -e/KWh)	(Angioletti & despretz, 2004)
Gaz	0.20191 (KgCO ₂ -e/KWh)	(APRUE, 2014)		

IV.3.1.1 Détail de calcul des IPs du critère « Caractéristique physique des matériaux de l'enveloppe »

Prenons l'exemple du matériau : « Ciment »

- La conductivité thermique : $\lambda=1.4$ (W/m.C°) ⇒ **P=0.6**
- L'effusivité thermique : $E = \sqrt{\lambda \times \rho \times C}$;
 ⇒ $E = \sqrt{1.4 \times 2200 \times 1080} = 1823.842$ (J.m²/S^{1/2}) ⇒ **P=0**
- La diffusivité thermique : $D = \frac{\lambda}{\rho \times C}$ (C : capacité calorifique (J/Kg.C°) et ρ : masse volumique (Kg/m³))
 ⇒ $D = \frac{1.4}{2200 \times 1080} \times 10^8 = 58.922$ (m/S²) ⇒ **P=0.5**

Ce calcul est mené pour tous les matériaux composants l'enveloppe extérieure du bâtiment. Ensuite, les valeurs moyennes sont calculées (Tableau IV.7).

Tableau IV.7. Calcul des IPs « conductivité, effusivité et diffusivité »

Matériaux	λ (W/m.C°).	P	C (J/Kg.C°)	ρ (Kg/m ³)	E (J.m ² /S ^{1/2})	P	D×10 ⁸ (m/S ²)	P
Mortier de ciment	1.4	0.6	1080	2200	1823.842	0.7	58.922	0.5
Brique creuse	0.48	0.86	936	900	635.886	0.5	56.98	0.5
Enduit plâtre	0.35	0.9	936	1000	572.363	0.5	37.39	0.7
Béton plan	1.75	0.5	1080	2500	2173.706	0.9	64.81	0.5
Verte	1.1	0.68	792	2700	1533.701	0.7	51.440	0.5
aluminium	230	0	936	2700	24109.251	0.9	9100.9	0.1
Revêtement de sol et de murs (céramique)	1	0.71	936	1900	1333.566	0.7	56.23	0.5
Performance		0.6				0.7		0.471

IV.3.1.2 Détail de calcul de IP « Déperdition thermique par transmission »

Il faut vérifier que $D_{T\text{ CALC}} \leq 1.05 \times D_{T\text{ réf}}$ (D.T.R. C 3-2)

A. Calcul des déperditions thermiques par transmission

$$D_{T\text{CAL}} = D_{Si} + D_{Li} + D_{SOLi} + D_{LNCi}$$

1) Calcul de D_{Si}

$$D_{Si} = K \times A$$

- D_{Si} : représente les déperditions surfaciques à travers les parties courantes des parois en contact avec l'extérieur en (W/C°) ;
- K (en W/m². °C) est le coefficient de transmission surfacique (appelé aussi conductance) ;
- A (en m²) est la surface intérieure de la paroi.

$$D_{Si} = (K \times A)_{\text{parois vertical}} + (K \times A)_{\text{toiture}}$$

Parois verticales

On a : $1/K = \sum R_{th} + 1/h_i + 1/h_e$

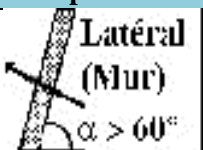
Les valeurs de K des matériaux qui forment les parois sont :

Tableau IV.8. Résistance thermique des matériaux constituant les parois

Matériaux de parois	λ (W/m.C°)	e (m)	$R_{th} = \frac{e}{\lambda}$ (m².W/C°)
Mortier de ciment	1.4	0.02	0.0142
Brique creuse	0.48	0.1	0.2083
L'air d'air	0.25	0.04	0.16
Brique creuse	0.48	0.1	0.2083
Mortier de ciment	1.4	0.02	0.0142
Enduit plâtre	0.35	0.01	0.0285
Totale (m².W/C°)			0.6335

Les valeurs des coefficients d'échanges superficiels sont donnés ci-dessous :

Tableau IV.9. Coefficients de d'échanges superficiels pour les murs

Description de cas	1/h (intérieure)	1/h (extérieure)	Totale
 Latéral (Mur) $\alpha > 60^\circ$	0.11	0.06	0.17 (m².W/C°)

Donc : $K = \frac{1}{(0.6335 + 0.17)} = \mathbf{1.2445 \text{ (m}^2 \cdot \text{W/C}^\circ\text{)}}$

$A_{\text{Prois brute}} = ((10.5 \times 2 \times 3.06) + (9.2 \times 2 \times 3.06))((1.2 \times 1.4 \times 4) + (0.4 + 0.6) + (1.2 \times 2.4 \times 2) + (2.2 \times 1 \times 2))$
 $\Rightarrow A_{\text{Prois brute}} = \mathbf{42.402 \text{ m}^2}$

Toiture

On a : $1/K = \sum R_{th} + 1/h_i + 1/h_e$

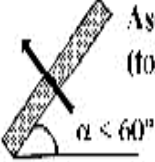
Les valeurs de K des matériaux qui forment les parois sont :

Tableau IV.10. Résistance thermique des matériaux constituant la toiture

Matériaux de toiture	λ (W/m.C°)	e (m)	$R_{th} = \frac{e}{\lambda}$ (m ² .W/C°)
Forme de ponte	1.75	0.1	0.0571
Dalle de compression	1.75	0.04	0.0228
Plancher corps creuse	1.45	0.16	0.1103
Enduit de ciment	1.4	0.015	0.0107
Totale (m ² .W/C°)			0.2009

Les valeurs des coefficients d'échanges superficiels sont donnés ci-dessous :

Tableau IV.11. Coefficients de d'échanges superficiels pour la toiture

Description de cas	1/h (intérieure)	1/h (extérieure)	Totale
 Ascendant (toiture) $\alpha < 60^\circ$	0.09	0.05	0.14 (m².W/C°)

Donc : $k = \frac{1}{(0.14+0.2009)} = 2.9334 \text{ (m}^2 \cdot \text{W/C}^\circ\text{)}$

A toiture brute = (10.5×9.2)-(4×2.4) ⇒ **A** toiture brute = **87 m²**

A.N: $D_{Si} = (1.2445 \times 42.402) + (2.9334 \times 87) \Rightarrow D_{Si} = 307.9750 \text{ W/C}^\circ$

2) Calcul de D_{LI}

On a : $D_{li} = \sum k_l \times L = 0.2 \times \sum K \times A = 0.2 \times D_s$

- **D_{LI}** : (en W/°C) représente les déperditions à travers les liaisons ;
- **K_I**(en W/m. °C) représente le coefficient de transmission linéique de la liaison ;
- **L** (en m) représente la longueur intérieure de la liaison.

A.N: $D_{li} = 0.2 \times D_s = 0.2 \times 307.9750 \Rightarrow D_{li} = 61.5950 \text{ W/C}^\circ$

3) Calcul D_{SOLi}

On a : $D_{SOL} = K_s \times P$

- **K_s** (en W/m. °C) est le coefficient de transmission linéique du plancher bas ;
- **p** (en m) est la longueur de la paroi définie (D.T.R. C 3-2) ;

A.N: $D_{SOL} = K_S \times P = 1.75 \times 10.5 \Rightarrow D_{SOL} = 18.375 W/C^\circ$

4) Calcul D_{LNCi}

On a : $D_{LNCi} = \text{Tau} (\sum K_L \times L + \sum K \times A)$; et **Tau** :est le coefficient de réduction de T°

A.N: $D_{LNCi} = 1 \times (61.5950 + 307.9750) \Rightarrow D_{LNCi} = 369.57 W/C^\circ$

Finalement :

$D_{T \text{ CALC}} = D_{Si} + D_{Li} + D_{SOLi} + D_{LNCi} \Rightarrow D_{T \text{ CALC}} = 757.515 W/C^\circ$

B. Pour les déperditions thermiques par transmission de référence

On a : $D_{\text{réf}} = a \times S_1 + b \times S_2 + c \times S_3 + d \times S_4 + e \times S_5$

S_i : Surfaces sont respectivement toiture, plancher bas, les murs, les porte, fenêtré et porte fenêtrés.

Et pour les coefficients a, b, c, d, e ; voir le tableau II.1 chapitre II. (D.T.R. C 3-2).

AN: $D_{\text{réf}} = 1.1 \times 87 + 2.4 \times 96.6 + 1.2 \times 102.684 + 3.5 \times 7.28 + 4.5 \times 10.6 \Leftrightarrow D_{\text{réf}} = 523.9408 W/C^\circ$

Conclusion : $D_{T \text{ CALC}} = 757.515 W/C^\circ > 1.05 \times D_{\text{réf}} = 1.05 \times 523.9408 W/C^\circ = 550.1378 W/C^\circ$

Condition n'est pas vérifier donc : $P = 0.1$

IV.3.2 Synthèse de calcul des IPs du premier cas d'étude

Nous avons assemblé les calculs des indicateurs est leurs performances dans les tableaux ci-dessous :

Tableau IV.12. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°01

Critère	Indicateur	Valeur de calcul	Note de performance
Orientation	Orientation de bâtiment (OR)	Nord-Est et Sud-ouest	
	Ratio de la façade orienté (FOR)	0.5329	
Morphologie	Nombre des niveaux ($N_{\text{étage}}$)	1	
	Compacité (C_P)	0.748 m^{-1}	

Tableau IV.13. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°01 (Suite)

Critère	Indicateur	Valeur de calcul	Note de performance
Couleur des parois	Couleur des parois intérieur (C_{int})	Cf. Tableau IV.4	<p>Cint 1 0,5 Cext</p>
	Couleur des parois (C_{ext})	Couleur rouge brique	
Ouvertures	Coefficient de gain de solier (S_w)	0.5	<p>Sw 0,5 FF 0,3666 UW 0,9</p>
	Indice Window (U_w)	2 w/m ² .K	
	Forme des fenêtres (FF)	Norme	
Aspect architectural	Distance entre les bâtiments (d_w)	> 1	<p>dw 0,9 CHauff 1 Vnat 0 Ps 1 Humi 1</p>
	Ventilation naturelle (V_{nat})	Non	
	Humidification (H_{umi})	Oui (technique a)	
	Protection solaire (P_s)	Oui (technique C)	
	Chauffage solaire passif (CH_{auff})	Oui	
Implantation	Zone climatique (ZC)	Zone C	<p>ZC 0,5 0,9 Alti</p>
	Altitude (A_{lti})	342 m	
Caractéristique physique des matériaux de l'enveloppe	Conductivité thermique (λ)	Cf. Tableau IV.7	<p>λ 0,6 D 0,471 E 0,7</p>
	l'effusivité thermique (E)		
	diffusivité thermique (D)		

Tableau IV.14. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°01 (Suite)

Critère	Indicateur	Valeur de calcul	Note de performance
Isolation	Utilisation d'un isolant (UT_{iso})	Non	
	Nature d'isolant (N_{iso})	Non	
	Dépense thermique par transmission (D_T)	$D_{T\text{ CALC}} = 757.515$ $>$ $D_{T\text{ réf}} = 550.1378$ (W/C°)	
consommation d'énergie fossile	Electricité (ELE)	27.163 (KWh/m ² .an)	
	Gaz	235.702(KWh/m ² .an)	
Consommation d'énergie renouvelable	Intégration des ER (Int_{ER})	Il n'y a pas	
	Ratio de la consommation des ER ($R_{R/F}$)	$\frac{ER}{EF} = 0$	
Efficacité énergétique des équipements	Classe énergétique des équipements (CEE)	Cf. Tableau IV.5	
	Système de chauffage et de refroidissement à base d'énergie renouvelable (S_{YS})	Non	
Usage des énergies	Utilisation des nouvelles technologies (UT_{ntech})	Oui	
	Utilisation d'un manuel d'aide à l'usage (UT_{mdl})	Non	
Pollution	Utilisation de matériaux respectueux de l'environnement	Non	
	Emission des gaz à effet de serre (CO ₂)	57.9943 $(K_g\ CO_2\ e/m^2/an)$	

IV.3.3 Synthèse de calcul des IPs du deuxième cas d'étude

Nous avons assemblé les calculs des indicateurs et leurs performances dans les tableaux ci-dessous :

Tableau IV.15. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°02

Critère	Indicateur	Valeur de calcul	Note de performance
Orientation	Orientation de bâtiment (OR)	NO-S.O	
	Ratio de la façade orienté (FOR)	0.51	
Morphologie	Nombre des niveaux (N_{étag})	RDC+5= 6	
	Compacité (C_P)	0.35 m ⁻¹	
Couleur des parois	Couleur des parois intérieur (C_{int})	$\frac{(0.9 \times 3) + (0.5 \times 3)}{6} = 0.7$	
	Couleur des parois (C_{ext})	Couleur blanche	
Ouvertures	Coefficient de gain de solier (S_w)	1	
	Indice Window (U_w)	>3w/m ² .K	
	Forme des fenêtres (FF)	Norme	
Aspect architectural	Distance entre les bâtiments (d_w)	> 1	
	Ventilation naturelle (V_{nat})	Non	
	Humidification (H_{umi})	Non	
	Protection solaire (P_s)	Oui (technique C)	
	Chauffage solaire passif (CH_{auff})	Oui	

Tableau IV.16. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°02 (Suite)

Critère	Indicateur	Valeur de calcul	Note de performance
Implantation	Zone climatique (ZC)	Zone C	
	Altitude (A _{lti})	342 m	
Caractéristique physique des matériaux de l'enveloppe	Conductivité thermique (λ)	Cf. Tableau IV.7	
	l'effusivité thermique (E)		
	diffusivité thermique (D)		
Isolation	Utilisation d'un isolant (U _{Tiso})	Non	
	Nature d'isolant (N _{iso})	Non	
	Dépense thermiques par transmission (D _T)	$D_{TC} = 7831.2036$ $<$ $D_{TRé} = 4999.9842$ (W/C°)	
consommation d'énergie fossile	Electricité (ELE)	23.0236 (KWh/m ² /an)	
	Gaz	197.5321 (KWh/m ² /an)	
Consommation d'énergie renouvelable	Intégration des ER (Int _{ER})	Il n'y a pas	
	Ratio de la consommation des ER (R _{RF})	$\frac{ER}{EF} = 0$	
Efficacité énergétique des équipements	Classe énergétique des équipements (CEE)	$CEE = \frac{15.34}{24} = 0.639$	
	Système de chauffage et de refroidissement à base d'énergie renouvelable (S _{ys})	Non	

Tableau IV.17. Synthèse de calcul des IPs et valeurs de performances du cas d'étude n°02 (Suite)

Critère	Indicateur	Valeur de calcul	Note de performance
Usage des énergies	Utilisation des nouvelles technologies (UT_{ntech})	Non	$ \begin{array}{c} Utntech \\ \\ 0 \text{ } \color{orange}{\blacklozenge} \text{ } 0 \\ \\ UTmdl \end{array} $
	Utilisation d'un manuel d'aide à l'usage (UT_{mdl})	Non	
Pollution	Utilisation de matériaux respectueux de l'environnement	Non	$ \begin{array}{c} UTmrl \\ \\ \color{orange}{\blacklozenge} \text{ } 0 \\ \\ 0,4 \text{ } \color{orange}{\blacklozenge} \text{ } EMCO2 \end{array} $
	Emission des gaz à effet de serre (CO_2)	48.7017 ($K_gCO_2 e/m^2.an$)	

IV.4 Pondération des IPs – 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 « Isolation »

A. Etape 1 : Hiérarchisation des IPs par importance

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

IP de degrés 1 : $D_t \Rightarrow$ IP de degrés 2 : $UT_{iso} \Rightarrow$ IP de degrés 3 : N_{iso}

Deuxièmement : On attribue à chaque IP_E un ordre de préférence à partir du tableau III. 26 pour construire une matrice appelée « Matrice de décision ».

Tableau IV.18. Attribution des ordres de préférences entre les IPs

	D_t	UT_{iso}	N_{iso}
D_t	1	7	8
UT_{iso}	1/7	1	1
N_{iso}	1/8	1	1

Ainsi, la matrice obtenue est : $A = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 8 \\ 7 & 1 & 1 \\ \frac{1}{8} & 1 & 1 \end{bmatrix}$

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

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{1+\frac{1}{7}+\frac{1}{8}} + \frac{\frac{1}{7}}{\frac{1}{7}+1+\frac{1}{8}} + \frac{\frac{1}{8}}{\frac{1}{8}+\frac{1}{7}+1} \\ \frac{7}{7+1+1} + \frac{1}{1+7+1} + \frac{1}{1+7+1} \\ \frac{8}{8+1+1} + \frac{1}{1+8+1} + \frac{1}{1+8+1} \end{bmatrix}$$

Ainsi les poids (W_i) obtenu sont : $w = \begin{bmatrix} 0.7888 \\ 0.1079 \\ 0.1032 \end{bmatrix}$

C. Etape 3 : Vérification de la consistance des résultats

Nous avons : $\begin{bmatrix} \lambda'1 \\ \lambda'2 \\ \lambda'3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 8 \\ \frac{1}{7} & 1 & 1 \\ \frac{1}{8} & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.7888 \\ 0.1079 \\ 0.1032 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.3702 \\ 0.3239 \\ 0.3098 \end{bmatrix}$

ET $\begin{bmatrix} \lambda1 \\ \lambda2 \\ \lambda3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.0047 \\ 3.0006 \\ 3.0006 \end{bmatrix}$

Alors $\lambda_{\max} = \frac{3.0047+3.0006+3.0006}{3} = 3.002$

- L'indice de consistance est : $CI = \frac{3.002-3}{2} = 0.0009$
- RI est tiré du Tableau III. 28 (Chapitre III) suivant la taille de la matrice de décision. Notre matrice de décision est de (3x3) alors, RI = 0.58
- Finalement : $CR = \frac{CI}{RI} = 0.0017$; CR est inférieur à 0,1 ; donc l'attribution des poids est **acceptable**.

II.1.4 Synthèse de calcul des pondérations

Tableau IV.19. Synthèse de pondération des indicateurs de la performance

Critère	Classement	Matrice de décision	w_i	λ'	λ	λ_{max}	CI	RI	CR						
Orientation	OR	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.5	Vérification non nécessaire											
	FOR		0.5												
Morphologie	C _P	$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.75												
	N _{étage}		0.25												
Couleur des parois	C _{int}	$\begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.8571												
	C _{ext}		0.1429												
Ouverture	U _w	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 5 \end{bmatrix}$	0.4545							1.3636	3	3	0	0.58	0
	FF		0.4545							1.3636	3				
	S _w		0.0909							0.2727	3				
Aspect architectural	d _w	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.2							Vérification non nécessaire					
	V _{nat}		0.2												
	P _s		0.2												
	H _{umi}		0.2												
	CH _{auff}		0.2												
Implantation	ZC	$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.75												
	A _{lti}		0.25												
Caractéristique physique des matériaux	λ	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.5	1.5	3	3	0	0.58	0						
	D		0.25	0.75	3										
	E		0.25	0.75	3										
Isolation	D _{th}	$\begin{bmatrix} 1 & 7 & 8 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.7888	2.3702	3.0047	3.002	0.0009	0.58	0.0017						
	UT _{iso}		0.1079	0.3239	3.0006										
	N _{iso}		0.1032	0.3098	3.0006										
Consommation d'énergie fossile	GAZ	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.5	Vérification non nécessaire											
	ELE		0.5												
Consommation d'énergie renouvelable	IntéER	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.5												
	R _{R/F}		0.5												
Ambiance intérieur	T	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	0.5390	1.6248	3.0147	3.0092	0.0046	0.58	0.0079						
	EC _{int}		0.2973	0.8943	3.0085										
	H		0.1638	0.4921	3.0044										
Efficacité énergétique des équipements	CEE	$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$	0.75	Vérification non nécessaire											
	S _{ys}		0.25												
Usage des énergies	UT _{ntech}	$\begin{bmatrix} 1 & 7 \\ 7 & 1 \end{bmatrix}$	0.8750												
	UT _{mdl}		0.1250												
Pollution	EM _{CO2}	$\begin{bmatrix} 1 & 5 \\ 5 & 1 \end{bmatrix}$	0.8333												
	UT _{mrl}		0.1667												

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).

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

Par la suite en va donner un exemple pour illustrer comment fait la méthode d'agrégation da calculer. Nous avons choisi le premier cas avec l'objectif aspect architecturale. Donc la méthode de d'agrégation donnée comme suit.

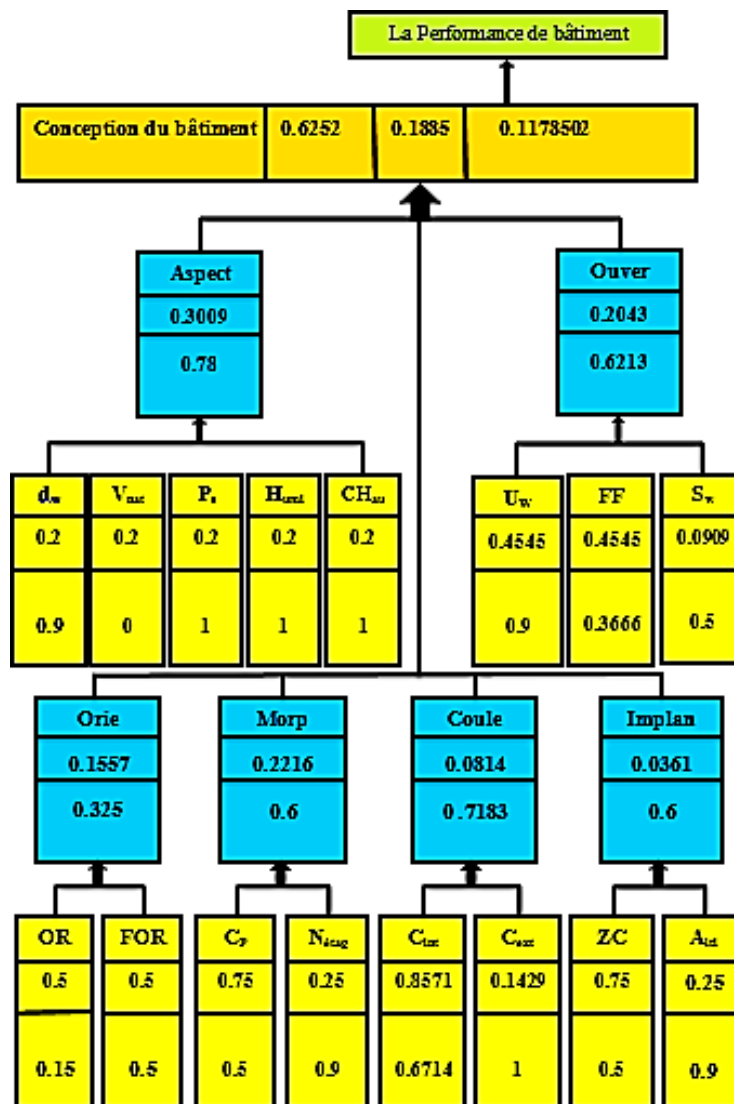


Figure IV.11. Agrégation des performances de l'objectif « Aspect architectural »

IV.5.1 Programmation d’un outil d’évaluation des performances

Dans le but de simplifier l’utilisation de la méthodologie proposée ainsi que de la base de données collectées, nous avons programmé un outil informatique sur le logiciel Visual Basic (Figure IV.12).

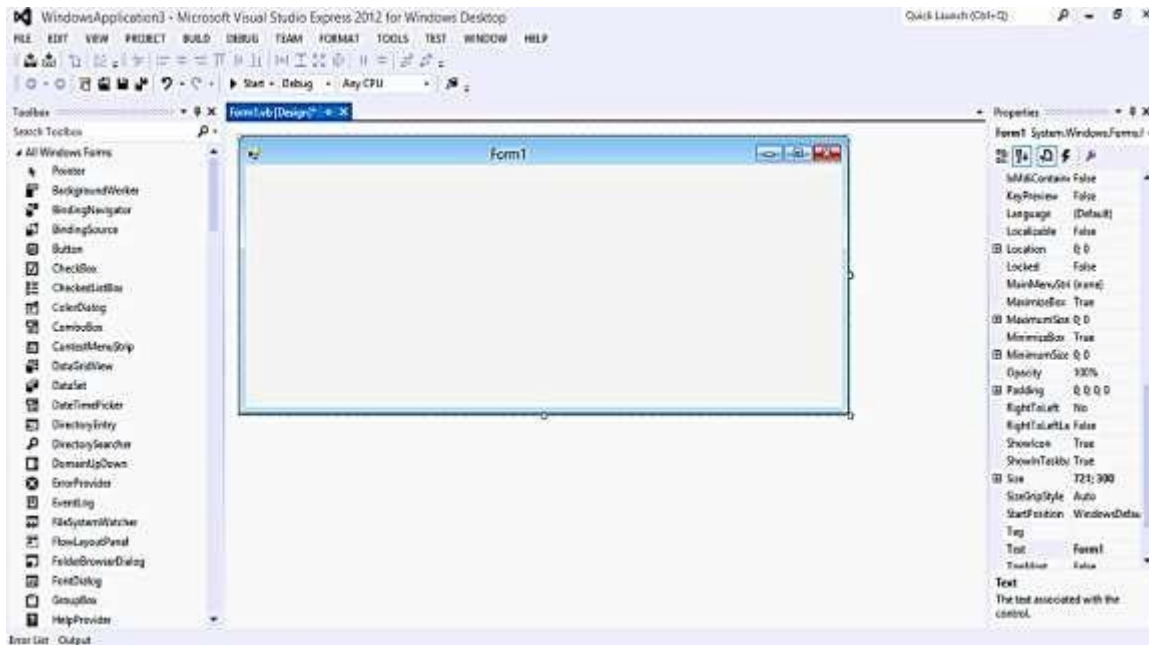


Figure IV.12. Interface du logiciel Visual Basic

La visualisation de la structure hiérarchique complète du problème permettra aussi de mieux comprendre le problème. Le programme de notre outil numérique est donné comme captures d’écrans.

```

Form1.vb* Form1.vb [Design]*
Form1 (Declarations)
Public Class Form1
    Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load
    End Sub
    Private Sub Button1_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button1.Click
        TextBox33.Text = Val(TextBox1.Text) * 0.1557 + Val(TextBox2.Text) * 0.1557
    End Sub
    Private Sub Button2_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button2.Click
        TextBox34.Text = Val(TextBox3.Text) * 0.2216 + Val(TextBox4.Text) * 0.2216
    End Sub
    Private Sub Button3_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button3.Click
        TextBox35.Text = Val(TextBox5.Text) * 0.0814 + Val(TextBox6.Text) * 0.0814
    End Sub
    Private Sub Button4_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button4.Click
        TextBox36.Text = Val(TextBox7.Text) * 0.2043 + Val(TextBox8.Text) * 0.2043 + Val(TextBox9.Text) * 0.2043
    End Sub
    Private Sub Button5_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button5.Click
        TextBox37.Text = Val(TextBox10.Text) * 0.3009 + Val(TextBox11.Text) * 0.3009 +
        Val(TextBox12.Text) * 0.3009 + Val(TextBox13.Text) * 0.3009 + Val(TextBox14.Text) * 0.3009
    End Sub
    Private Sub Button6_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button6.Click
        TextBox38.Text = Val(TextBox15.Text) * 0.0361 + Val(TextBox16.Text) * 0.0361
    End Sub
End Class
    
```

```

Form1.vb* - X Form1.vb [Design]*
Form1 (Declarations)
Private Sub Button6_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button6.Click
    TextBox38.Text = Val(TextBox15.Text) * 0.0361 + Val(TextBox16.Text) * 0.0361
End Sub
Private Sub Button7_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button7.Click
    TextBox39.Text = Val(TextBox17.Text) * 0.6667 + Val(TextBox18.Text) * 0.6667 + Val(TextBox19.Text) * 0.6667
End Sub
Private Sub Button8_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button8.Click
    TextBox40.Text = (Val(TextBox20.Text) * 0.3333 + Val(TextBox21.Text) * 0.3333 + Val(TextBox22.Text) * 0.3333)
End Sub
Private Sub Button9_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button9.Click
    TextBox41.Text = Val(TextBox23.Text) * 0.1 + Val(TextBox24.Text) * 0.1
End Sub
Private Sub Button10_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button10.Click
    TextBox42.Text = Val(TextBox25.Text) * 0.9 + Val(TextBox26.Text) * 0.9
End Sub
Private Sub Button11_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button11.Click
    TextBox43.Text = Val(TextBox27.Text) * 0.6667 + Val(TextBox28.Text) * 0.6667
End Sub
Private Sub Button12_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button12.Click
    TextBox44.Text = Val(TextBox29.Text) * 0.3333 + Val(TextBox30.Text) * 0.3333
End Sub
Private Sub Button13_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button13.Click
    TextBox45.Text = Val(TextBox31.Text) * 1 + Val(TextBox32.Text) * 1
End Sub
100 %
    
```

```

Form1.vb* - X Form1.vb [Design]*
Form1 (Declarations)
Private Sub Button14_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button14.Click
    TextBox46.Text = (Val(TextBox1.Text) * 0.1557 + Val(TextBox2.Text) * 0.1557 +
        Val(TextBox3.Text) * 0.2216 + Val(TextBox4.Text) * 0.2216 +
        Val(TextBox5.Text) * 0.0814 + Val(TextBox6.Text) * 0.0814 +
        Val(TextBox7.Text) * 0.2043 + Val(TextBox8.Text) * 0.2043 +
        Val(TextBox9.Text) * 0.2043 + Val(TextBox10.Text) * 0.3009 +
        Val(TextBox11.Text) * 0.3009 + Val(TextBox12.Text) * 0.3009 +
        Val(TextBox13.Text) * 0.3009 + Val(TextBox14.Text) * 0.3009 +
        Val(TextBox15.Text) * 0.0361 + Val(TextBox16.Text) * 0.0361) * 0.1885
End Sub
Private Sub Button15_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button15.Click
    TextBox47.Text = (Val(TextBox17.Text) * 0.6667 + Val(TextBox18.Text) * 0.6667 +
        Val(TextBox19.Text) * 0.6667 + Val(TextBox20.Text) * 0.3333 +
        Val(TextBox21.Text) * 0.3333 + Val(TextBox22.Text) * 0.3333) * 0.1366
End Sub
Private Sub Button16_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button16.Click
    TextBox48.Text = (Val(TextBox23.Text) * 0.1 + Val(TextBox24.Text) * 0.1 +
        Val(TextBox25.Text) * 0.9 + Val(TextBox26.Text) * 0.9) * 0.3366
End Sub
Private Sub Button17_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button17.Click
    TextBox49.Text = (Val(TextBox27.Text) * 0.6667 + Val(TextBox28.Text) * 0.6667 + Val(TextBox29.Text) * 0.3333 + V
End Sub
Private Sub Button18_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button18.Click
    TextBox50.Text = (Val(TextBox31.Text) * 1 + Val(TextBox32.Text) * 1) * 0.2924
End Sub
    
```

```

Form1.vb [Design]* Form1.vb* X
Form1 (Declarations)
    TextBox50.Text = (Val(TextBox31.Text) * 1 + Val(TextBox32.Text) * 1) * 0.2924
End Sub

Private Sub Button19_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button19.Click
    TextBox51.Text = ((Val(TextBox1.Text) * 0.1557 + Val(TextBox2.Text) * 0.1557 +
        Val(TextBox3.Text) * 0.2216 + Val(TextBox4.Text) * 0.2216 +
        Val(TextBox5.Text) * 0.0814 + Val(TextBox6.Text) * 0.0814 +
        Val(TextBox7.Text) * 0.2043 + Val(TextBox8.Text) * 0.2043 +
        Val(TextBox9.Text) * 0.2043 + Val(TextBox10.Text) * 0.3009 +
        Val(TextBox11.Text) * 0.3009 + Val(TextBox12.Text) * 0.3009 +
        Val(TextBox13.Text) * 0.3009 + Val(TextBox14.Text) * 0.3009 +
        Val(TextBox15.Text) * 0.0361 + Val(TextBox16.Text) * 0.0361) *
        0.1885) + (Val(TextBox17.Text) * 0.6667 + Val(TextBox18.Text) * 0.6667 +
        Val(TextBox19.Text) * 0.6667 + Val(TextBox20.Text) * 0.3333 +
        Val(TextBox21.Text) * 0.3333 + Val(TextBox22.Text) * 0.3333) * 0.1366 +
        (Val(TextBox23.Text) * 0.1 + Val(TextBox24.Text) * 0.1 +
        Val(TextBox25.Text) * 0.9 + Val(TextBox26.Text) * 0.9) * 0.3366 +
        (Val(TextBox27.Text) * 0.6667 + Val(TextBox28.Text) * 0.6667 +
        Val(TextBox29.Text) * 0.3333 + Val(TextBox30.Text) * 0.3333) * 0.0458 +
        (Val(TextBox31.Text) * 1 + Val(TextBox32.Text) * 1) * 0.2924
End Sub

Private Sub Button21_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button21.Click
    End
End Sub
End Class
    
```

Figure IV.13. Programme de l'outil informatique sur Visual Basic

IV.5.1.1 Cas d'étude n°01 (Maison individuelle)

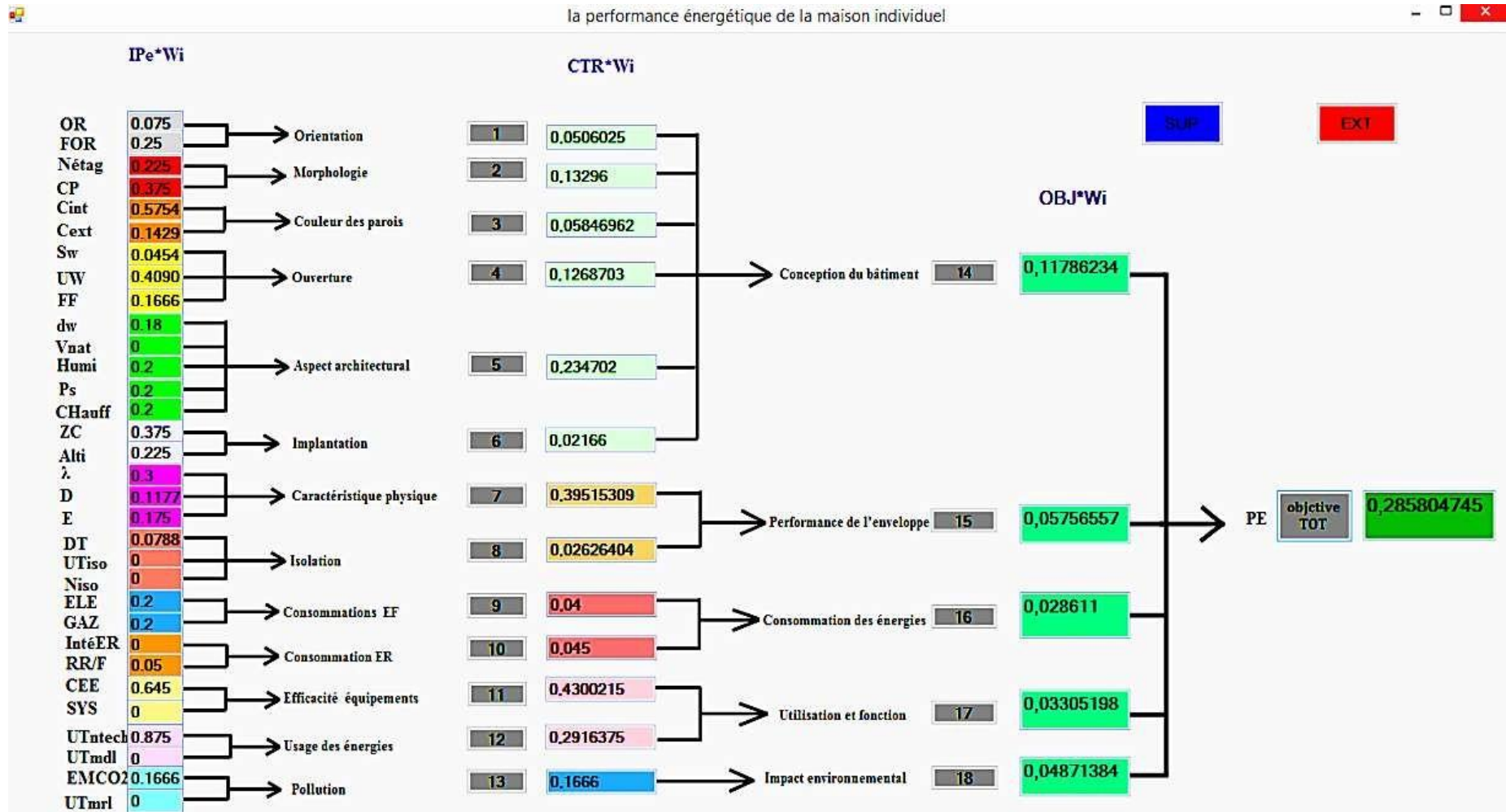


Figure IV.14. Processus d'agrégation des performances du cas d'étude n°01 sur Visual Basic

IV.5.1.2 Cas d’étude n°02 (Bâtiment collectif)

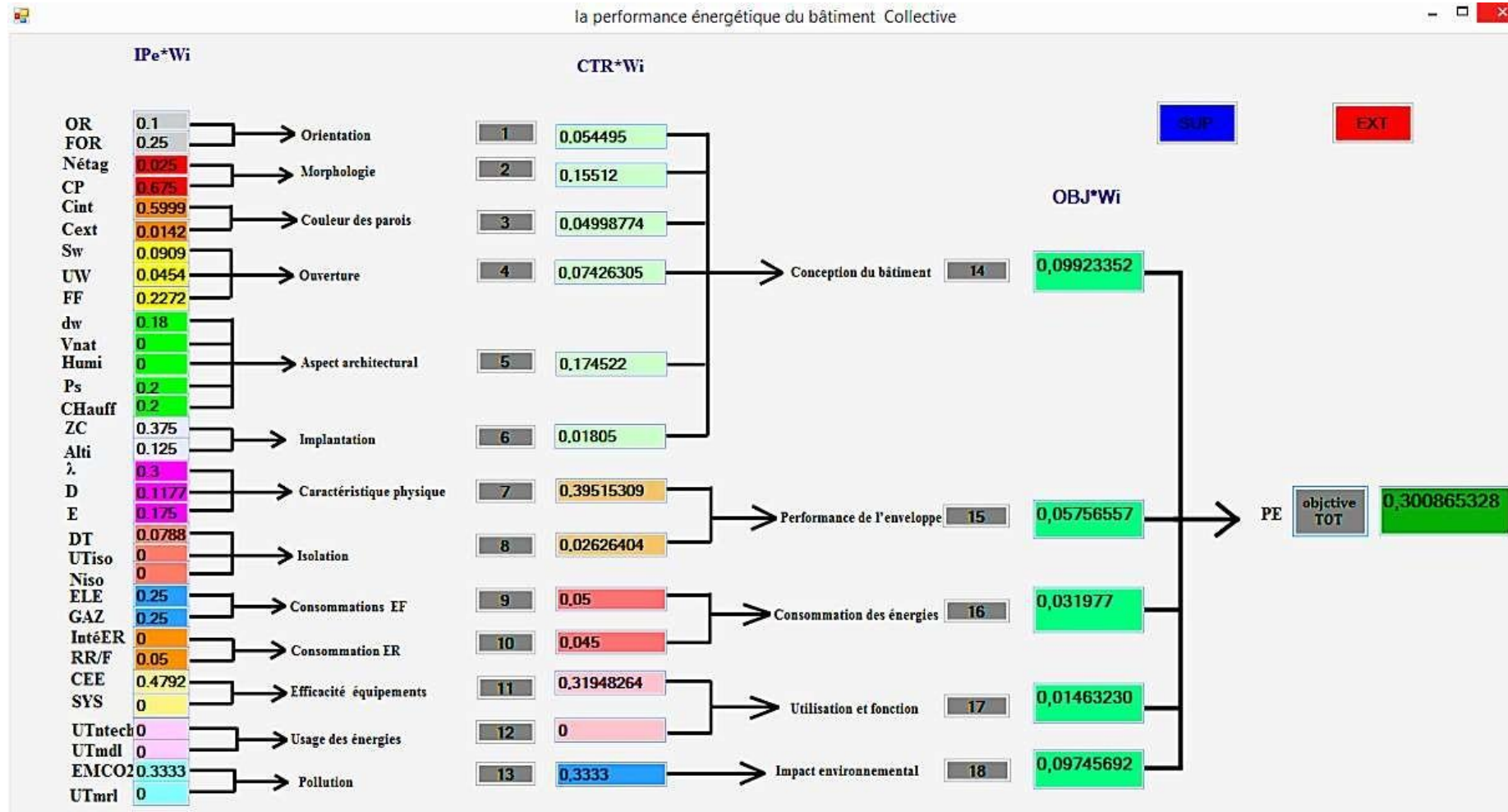


Figure IV.15. Processus d’agrégation des performances du cas d’étude n°02 sur Visual Basic

IV.6 Discussion des résultats

Dans ce chapitre, nous a choisi pour notre application deux exemples de bâtiments d'habitation à la willaya de Bouira. Le premier est une maison individuelle et le deuxième est un bâtiment collectif. Ces deux types de bâtiments d'habitation sont la plus grande source de gaspillage d'énergies dans le secteur. Ce choix a aussi pour objectif de tenir des différentes caractéristiques de la structure, dans le but d'en tenir compte des différentes exigences de notre méthodologie.

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

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, consommation énergétique, etc.).

Puis, 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 résultats de performance obtenus ainsi que les valeurs de calculs précédentes ont été regroupés dans des tableaux d'évaluation des performances énergétiques (Tableaux IV.3 – IV.17).

Par l'application de la méthode AHP nous nous sommes intéressé aux calculs des poids des indicateurs. Ce calcul est la première étape du processus ascendant visant à calculer les performances des niveaux supérieurs de la méthodologie et est basé sur la construction de matrices de décisions, qui sont établies à partir d'une comparaison de deux à deux en attribuant des degrés d'importances ordonnant ainsi l'intensité d'importance entre les différents paramètres de performance. Nous notons que ce processus est entaché par une petite part de subjectivité de l'utilisateur (décideur). Cependant, la méthode offre une mesure de vérification des jugements avec l'indice *CR*.

Les résultats obtenus depuis ce processus de pondération nous ont permis, alors, de classer les paramètres de vulnérabilité par ordre d'importance. Ensuite, le calcul les performances de tous les paramètres de l'évaluation des performances des différents niveaux de la démarche ascendante par l'application de la méthode MSP a été entrepris. Nous avons utilisé l'outil informatique développée pour ce calcul. Les résultats ont été présentés dans les Figures IV.1 et 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 obtenues par critères

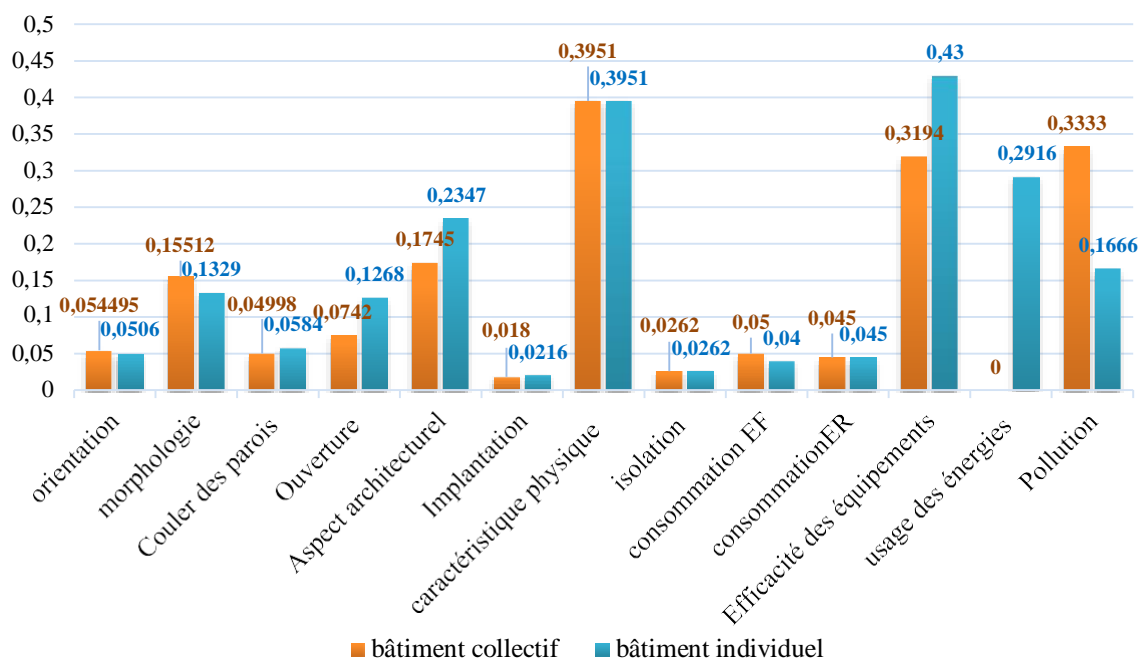


Figure IV.16. Performances obtenues par critères

Performances obtenues par objectifs

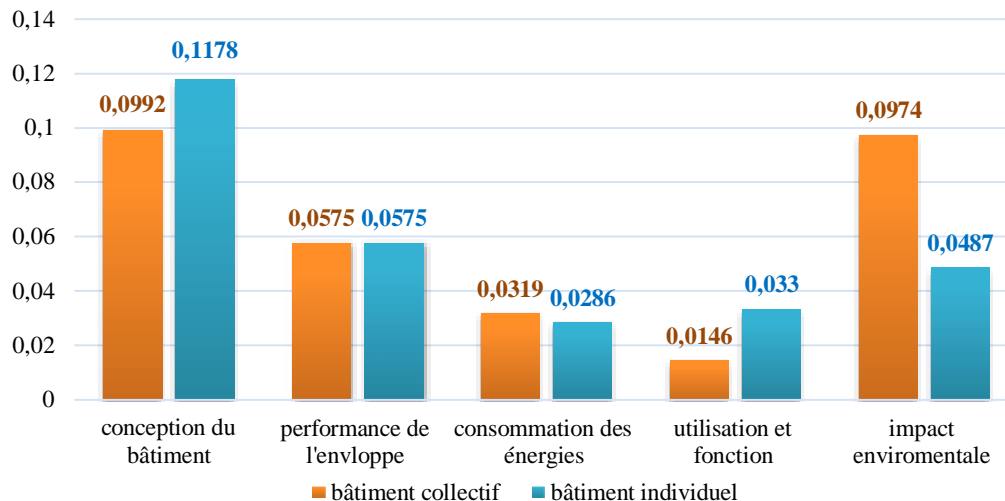


Figure IV.17. Performances obtenues par objectifs

D'après les graphes précédents, nous remarquons qu'il y'a de petite différences entre les valeurs des performances obtenues par agrégation par la méthode de MSP. Ces différences sont relatives, essentiellement, aux modes de construction (habitat privée et habitat collectif), à la quantité d'énergies consommée et éventuellement à la zone géographique, etc.

Idice de performance énergétique des cas étudiés

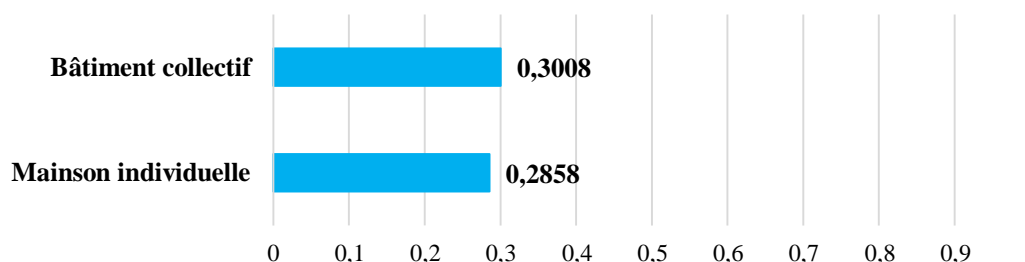


Figure IV.18. Performance énergétique des bâtiments étudiés

Dans le premier cas (maison individuelle) nous avons obtenu une performance de 0.2858 qui est une mauvaise performance énergétique. Similairement, le bâtiment collectif quant à lui a affiché une performance de 0.3008 (Figure IV.18).

Les résultats sont proches. Les bâtiments collectifs devancent les habitats individuels de peu ! Nous essayerons ci-dessous d'apporter quelques explications :

- Les bâtiments collectifs sont mieux construits du fait du respect des normes de construction.
- Le niveau de confort recherché est plus exigeant du côté de l'habitat individuel. Ceci est démontré par les statistiques de l'APRUE (2019), où 65% de la consommation d'énergies des bâtiments résidentiels en Algérie provient des bâtiments individuels. Ce constat appuie davantage cette hypothèse.
- Un autre facteur, celui de l'impact environnemental. La forte consommation d'énergies accentue les émissions de CO₂.

IV.7 Conclusion

Durant ce chapitre nous avons appliqué la méthode développée dans le chapitre III. Nous avons commencé par le calcul des différentes performances après avoir estimé leurs valeurs à partir des méthodes de calcul développées. La classification des indicateurs de performance énergétique selon leurs importances sur une échelle 0-9 a été faite en utilisant la méthode AHP pour ensuite calculer leurs coefficients de pondération.

Le calcul des performances de chaque bâtiment a été entrepris 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 présenté les résultats obtenus sous différentes formes (tableaux, courbes radars et programme sur Visual basic) que nous avons ensuite discuté et argumenté.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le secteur du bâtiment est un formidable gisement d'opportunités face aux enjeux économiques, sociaux, climatiques, énergétiques et environnementaux. Cependant, il doit composer avec des contraintes majeures : la sécurité et la santé des usagers vis-à-vis des équipements du bâtiment (qualité de l'eau, ...) et des risques naturels (sismiques notamment), l'espace qui conditionne le confort et la communication avec l'extérieur (possibilité de stationnement, gestion des déchets, etc.) et d'autres contraintes spécifiques (mode de vie de la société algérienne, matériaux de construction locaux, ...). Un bâtiment sera donc d'autant plus durable que ses performances vis-à-vis de tous ces aspects et contraintes soient meilleures.

Le bâtiment d'aujourd'hui évolue, et celui de demain évoluera encore plus vite et ce sont les économies, voire les créations d'énergies qui seront le fer de lance de cette dynamique.

Aujourd'hui, le parc algérien de bâtiments bâtis est une source de gaspillage énergétique. L'ancien parc bâti, qui constitue une grande part du parc bâti en Algérie, constitue à lui seul une source de gaspillage énergétique de plus de 43% de la consommation nationale globale (APRUE, 2019). La prise de conscience de l'importance de l'aspect énergétique est maintenant bien ancrée chez les différents acteurs de la construction. Ceci s'est traduit par le lancement de plusieurs programmes d'efficacité énergétique en 2011 par le ministère de l'énergie et des mines, notamment le programme Eco-Bat qui vise à construire plus de 6000 logement à haute performance énergétique financé par le fond national pour la maîtrise de l'énergie.

Ce travail entre dans le cadre d'une contribution à la mise en place d'une méthodologie globale, basée sur l'approche performantielle et les méthodes multicritères de décision, destinée à évaluer la performance énergétique des bâtiments d'habitation en Algérie.

Il est clair que ce projet est un projet à long terme qui s'inscrit dans le cadre d'un programme général de recherche, on a pu tirer une étude simplifiée qui a deux objectifs principaux. Le premier est de structurer les fondements de la méthodologie (choix des méthodes, définition des paramètres d'évaluation, sélection des méthodes, etc.). Le deuxième, est de valider la méthodologie à travers une application sur des cas réels.

Dans le but de mettre en place une telle méthodologie, nous avons commencé dans le chapitre 01 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, et pour comprendre l'applicabilité et les limites de notre méthodologie, une connaissance de l'état des lieux du parc résidentiel algérien était essentiel. 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 performance énergétique ont été recensés, des méthodes de calcul ont été définies 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 cet indice de performance énergétique. 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.

A l'issue de cette recherche nous tirons les conclusions suivantes :

- Les valeurs des performances obtenues pour la maison individuelle et le bâtiment collectif étaient respectivement égales à 0.2858 et 0.3008. Ces faibles valeurs de performance sont en parfaite concordance avec la position de grand consommateur énergétique.
- La liste des IPs utilisée n'est pas exhaustive mais pourrait être améliorée en intégrant plus d'IPs à la méthodologie.
- Les méthodes de calcul, les échelles de performance peuvent aussi être améliorées.
- L'AHP, malgré sa complexité, est une méthode très exacte permettant de vérifier la cohérence des relations d'importance entre indicateurs. La méthode des sommes pondérées offre l'avantage de la clarté et de la simplicité d'utilisation.

Comme perspectives :

- A l'état actuel, nous n'avons pas pu évaluer la performance de tous les critères et des indicateurs, pour cause de manque des références de vérifications ou des normes d'appréciation, ou bien pour l'inexistence des données nécessaires pour calculer les indicateurs, et parfois à cause de la non homogénéité des échelles de performance des critères. Cette perspective est l'une des priorités à aborder par la suite.
- La pondération des IPs renferme une petite part de subjectivité lors de la construction des matrices de décision qui peut être 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.

L'application du concept d'efficacité énergétique assure trois objectifs fondamentaux :

- Economiser l'énergie et ainsi contribuer à la croissance de l'économie nationale en vendant ce surplus énergie ou en l'utilisant pour activer le mouvement de développement local.
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Atteindre le bien-être des citoyens à l'intérieur de leurs maisons sans gaspiller d'énergie et en réduisant leurs factures.

Pour améliorer l'efficacité énergétique il faut par l'activation les trois concepts qui nous illustré par l'organigramme suivant :

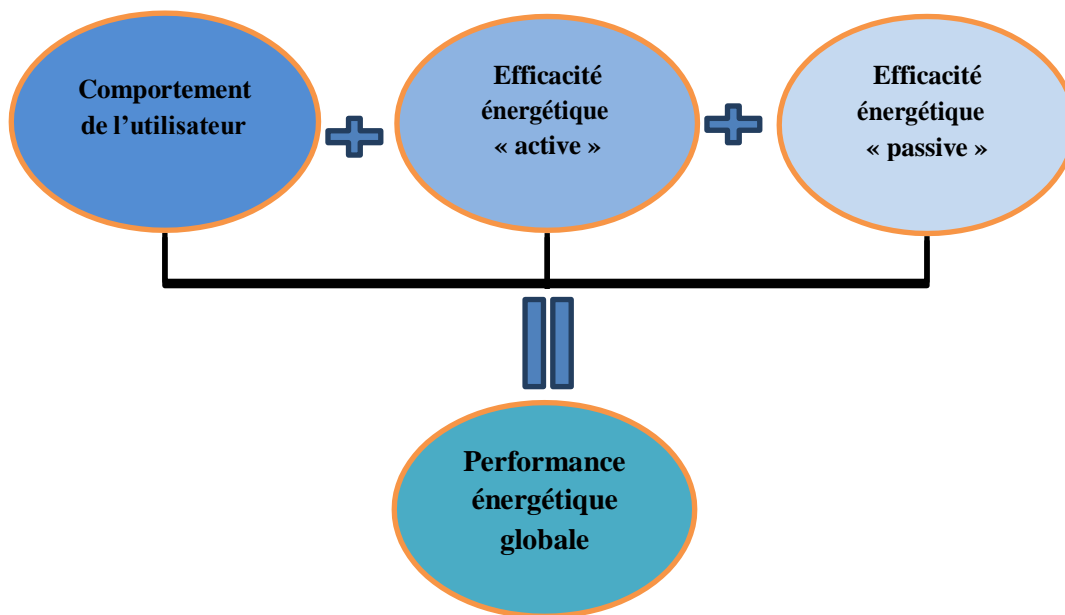


Figure IV.19. Démarche d'amélioration de l'efficacité énergétique

Références bibliographiques

Bibliographie

[AGREBI, M. 2018, AVRIL 12]. Méthodes d'aide a la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection dans un environnement certain/incertain: cas de la localisation des centres de distribution. Sfax, Département Informatique, Tunisie.

[A.BISWAS,2009] application of VICOR based taguchi method for multi-reponse optimization a case study in submerged arc welding (SAW) proceedings of the international conference on mechanical engineering 2009 (ICME2009), december 2009 dhaka, bangladesh

[ATTAQA, 2022] *l'énergie hydraulique* <https://attaqa.net/>

[ALGERIE PRESSE SERVICE ,2022]. **ressources énergétiques d'origine géothermale, a indiqué le commissariat aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique (cerefe) dans une publication.** la place africaine de l'algérie dans la production d'énergie renouvelable

[ATHMANE OUAHAB, 2015] modélisation des consommation d'énergie et des émissions de CO₂ à long terme appliquée au secteur résidentiel algérien , thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université francois-rabelais de tours ,specialite aménagement de l'espace, urbanisme

[ALGERIE PRESSE SERVICE, juin 2018] plus de 3,6 millions de logements réalisés entre 1999 et 2018 **de différentes formules** (LPL, ruraux, logements de fonction, LPP, LPA 1 AADL, promotionnels libres, auto-construction

[APRUE, 2021] agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (2014) **l'indicateurs retrived from** <http://aprue.org.dz>

[ADEME, 2022] agence de la transition écologique <https://presse.ademe.fr/>

[BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY 2021] BP Statistical Review of World Energy 2021 - 69th edition <https://www.bp.com/en/>

- [BOUHDJAR ET ALL 2012] Bulletin des énergies renouvelables N°22-2012, Énergies Renouvelables -Développement Durable- Environnement, 25p.
- [BRANS ET AL., 1986]. How to select and how to rank projects : The PROMETHEE method. European journal of operational research, 24(2):228–238
- [B.TAIBI, 2010] La stratégie d'imitation : Une perspective par les compétences
<https://www.cairn.info/revue-des-sciences-de-gestion-2010-2-page-93.htm>
- [BOULANGER, PAUL-MARIE. 2004] “les indicateurs de développement durable: un défi scientifique, un enjeu démocratique”. les séminaires de l’iddri.n°12. p. 1-24.
- [Brahim BAOUCHI 2014]Programme d’Efficacité Énergétique en Algérie
<https://particulier.hellio.com/blog/conseils/performance-energetique>
- [BATI CONCEPT] Construction et rénovation de maisons - écologique - bioclimatique - durable - BBC - en AUVERGNE
http://mmonceaux.free.fr/solaire_thermique/Le%20fonctionnement%20d%27un%20mur%20Trombe%20ou%20mur%20capteur.html
- [BILANS-THERMIQUE.FR 2020]caractéristique physique des matériaux <https://bilans-thermiques.fr>
- [BEN MENA,2000] ben mena, s., introduction aux méthodes multicritères d’aide à la décision. biotechnol. agron. soc. environ, 2000. 2: p. 83-93
- [B CHATEAU & Bruno LAPPILONNE, 1977] La Prévision a Long Terme De La Demande D’énergie propositions méthodologiques éditions du centre national de la recherche scientifique, Paris 1977 p.90
- [BRYHN,JIMENEZ,MATEOS,&RIOS-INSUA,2009] multi-attribute analysis of trophic state and waterfowl management in ringkøbing fjord, denmark
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19254823/>
- [ConocoPhillips .2002] définition du pétrole www.conocophillips.com
- [CONNAISSANCE DES ENERGIES], <https://www.connaissancedesenergies.org/la-consommation-mondiale-denergie-pourrait-quasiment-augmenter-de-moitie-dici-2050-220218>
- [CAPP 2022] la consommation d’énergie en chiffres
<https://www.capp.ca/fr/energie/besoins-energetiques-mondiaux/>
- [CHARLOTTE YAN, 2018] analyse multicritère pour évaluer les options de chauffage des communautés isolées du nunavik , mémoire par article présenté à l’école de technologie supérieure comme exigence partielle à l’obtention de la maîtrise avec mémoire en génie de l’environnement m.sc.a., ecole de technologie superieure universite du quebec

[CHERQUI, F. 2005]. "méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier méthode adequa". thèse de doctorat. Université de la rochelle. 180 pp.

[CONG, N ET AL 2007] comprehensive evaluation criterion system of building energy conservation. intelligent building 85, 47–49 issn:1672-1640 (in chinese).

[COEXPERT, 2018] Systèmes de chauffage et refroidissement à base d'énergie renouvelable, Utilisation des nouvelles technologies
<https://coexpert.comap.fr/category/efficacite-energetique/>

[CHERRARED ET AL.2011] article, application de la méthode ahp pour l'évaluation de la performance des systèmes d'assainissement urbains january 2011 [journal of decision system](http://www.journalofdecision.com) 20(1):103-127

[DGRIS ,JUN 2021] évolution de la consommation d'énergie finale de l'algérie dans le secteur résidentiel (2000- 2019). www.iris-france.org/observatoires/observatoire-securite-flux-energie

[DING, L ET AL 2003] the construction of comprehensive assessment indicators system of building energy conservation-hot summer cold winter zone. architecture and construction 12, 19–22 issn:0577-7429 (in chinese).

[D.T.R.C 3-2] réglementation thermique des bâtiments d'habitation règles de calcul des déperditions calorifiques

[De Béthencourt, et al, 2013]Efficacité énergétique : un gisement d'économies ; un objectif prioritaire. Paris : Les éditions des journaux officiels.

[EDF 2021] LE NUCLÉAIRE DANS LE MONDE

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres>

[ECOBATI, 2015] la diffusivité thermique « d » <https://www.ecobati.com>

[FERTAS, 2019] contribution au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité sociale aux séismes des villes algériennes - partie i : application à l'échelle du bâtiment isolé, mémoire de master, université akli mohand oulhadj de bouira, faculte des sciences et des sciences appliquees, département génie civil.

[FATEMEH ET AL., 2017] study of the impact of occupant behaviors on the energy performance of building envelopes using occupants' data energy and building 148 , 182-198. <https://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.085>

[journal planète énergies,2016] . Qu'est-ce qu'une énergie fossile
<https://www.planete-energies.com/>

[JEAN EUDES MONCOMBLE2013] : les politiques d'efficacité énergétique dans le monde –ce qui marche et ce qui ne marche pas l'étude a bénéficié du soutien de l'ademe (agence de

l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, publié en 2013 par conseil français de l'énergie

[HUGONNARD, J. ET ROY, B. 1982] Le plan d'extension du métro en banlieue parisienne, un cas type d'application de l'analyse multicritère. Les Cahiers Scientifiques de la Revue Transports, (6):77–108. 1er trimestre.

[HELLEUX, 2019] menuiserie helleux fabrication des fenêtres, coefficient de gain de soleille indice windows, forme de fenêtre. <https://www.helleux.fr/>

[HAMDADOU DJAMILA 2021] les systèmes d'aide à la décision , université oran1 faculté des sciences exactes et appliquées département d'informatique laboratoire d'informatique d'oran (LIO)

[IEA 2018] Agence internationale de l'énergie, .La production de l'électricité dans le monde(2018) <https://www.iea.org/>

[IBTISSAME BENOUDJAFER ,2018] vers une amélioration de la performance énergétique des habitation : la certification énergétique comme une stratégie durable .cas de la ville de bechar ,thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat en science en architecture ,université Mohamed khider- Biskra faculté des science et de la technologie département architecture

[GREGORY,2013]. Approche hybride d'optimisation pour la gestion d'énergie dans le bâtiment. Thèse Automatique Productive. Mireille JACOMINO, 170p.

[GLOBAL ABC, 2018] bilan mondial vers un secteur des bâtiments et de la construction à émission zéro efficace et résilient, troisième édition .united nations environment programme

[KOEZJAKOV ET AL] the relationship between operational energy demand and embodied energy in dutch residential buildings. energy and buildings, v165, p233-245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.036>

[KNEIFEL, J., & O'REAR, 2016], reducing the impacts of weather variability on long-term building energy performance by adopting energy-efficient measures and systems: a case study, journal of building performance simulation. v 10(issue 1), p 58–71. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1256431>.

[KIM, ET AL 2005] development of a housing performance evaluation model for multi-family residential buildings in korea. building and environment, 40(8), 1103–1116. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.09.014>

[LEITFADEN.] concepts énergétique, environnementaux et de santé, concept énergétique.

[LOONEN ET AL., 2016] review of status requirements , and opportunities for building performance simulation of facades , journal of building performance simulation . v10 (issue 2) p 205-223. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1152303>

[LAZRI LYDIA,2019] contribution à l'étude du confort thermique dans le bâtiment : élaboration d'un béton à haut performance énergétique intégrant des mcps ,mémoire de

master , universite mouloud mammeri de tizi-ouzou, faculte du genie de la construction
departement d'architecture

[LIU, A ET AL , 2006] construction of evaluation criterion system of building energy
conservation. power dsm 8, 39–42 issn:1009-1831 (in chinese

[LIMA YEM&YANNOU, 2004] article, les méthodes de comparaison par paires - intérêt
fondamental, méthodes pratiques, avancées scientifiques, logiciel - première partie : intérêt
fondamental <https://www.researchgate.net/>

[MARK VELASQUEZ AND PATRICK T. HESTE 2013] An Analysis of Multi-Criteria
Decision Making Methods International Journal of Operations Research Vol. 10, No. 2,
56–66 (2013)

.[MEM 2021] ministère de l'énergie et des mines bilan énergétique année 2021
<https://www.energy.gov.dz>

[LKERIA 2019] Bilan des livraisons de logement en Algérie entre 1999 et 2018 selon les
chiffres officiels. D'après Le site des annonces immobilières www.lkeria.com

[MADE-IN-ALEGRIA] programme eco-bat meilleure performance énergétique dans le
bâtiment **retrived from made-in-algeria.com**

[MATHIEU THOREL, 2006] aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios
d'amélioration énergétique via une approche globale, thèse pour obtenir le grade de docteur
de l'universite de grenoble specialite genie civil et science de l'habitat

[MADJID AMIRAT ET A L, 2011] réglementation thermique algérienne des bâtiments,
contribution à la définition de nouveaux coefficients réglementaires
<https://www.tandfonline.com/>

[MEHIRA CHAYMA, 2021] influence de l'enveloppe architecturale sur la performance
énergétique des bâtiments université 8 mai 1945-guelma, [facultés des sciences et de la
techngie](http://facultés.des.sciences.et.de.la.techngie) département d'architecture <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/>

[MHU, 2001] ministère de l'habitat et de l'urbanisme. (2001). prescription fonctionnelle et
technique. journal officiel de la republique algerienne democratique et populaire n°52.
retrieved from<http://joradp.dz>.)

[MME ATIK-KARIMA MEHAOUED 2019] impact des bâtiments de verre réfléchissant
sur le microclimat urbain et la consommation énergétique cas de la saison estivale à alger,
thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat en science en architecture, universite
mohamed khider-biskra ,departement architecture

[MOUSSAOUI, F., CHERRARED, M., KACIMI, M. A., & BELARBI, R. 2018] a genetic
algorithm to optimize consistency ratio in ahp method for energy performance assessment of
residential buildings — application of top-down and bottom-up approaches in algerian case
study. sustainable cities and society, 42 (august 2017) 622-636.

[MOUSSAOUI .F, 2018] Moussaoui, F. (2018). Contribution à l'évaluation de la durabilité
des bâtiments d'habitation enAlgérie. Thèse de doctorat. Université de Bejaia, Algérie

[MAISONSUR, 2022] consommation d'électricité (ELE) et(GAZ).

<https://www.maisonsur.com/>

[NAVID ET AL., 2018] sensitivity analysis of building energy performance : a simulation-based approach using ofat and variance-based sensitivity analysis methods . journal of building engineering, v15, p181-193. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.11.020>

[NIMA AMANI 2017], energy efficiency using the simulation software of atrium thermal environment in residential building: a case study, advances in building energy research, 13, 65-79. <http://dx.doi.org/10.1080/17512549.2017.1354781>

[NABILA AIT AHMED ,2017] l'efficacité énergétique dans le bâtiment cas d'un bâtiment tertiaire a boumerdes, mémoire de master en architecture universite mouloud mammeri de tizi-ouzou faculte de genie de la construction

[NASSAR, THABET, &BELIVEAU, 2003] article, simulation of asphalt paving operations under lane closure conditions september 2003 [automation in construction](#) 12(5):527-541 <https://www.researchgate.net/>

[OBSERVATOIRE DE LA SECURITE DES FLUX ET DES MATIERES ENERGETIQUES] les enjeux énergétiques en afrique du nord focus sur l'algerie les fiches sur l'algerie – juin 2021 accessibles en ligne sur www.iris-france.org/observatoires/observatoire-securite-flux-energie

[PEMACO2011] le livre blanc de l'efficacité énergétique. schneider electric. février 2011).

[PASSIV ACT, 2017] l'effusivité thermique « e » <https://passivact.fr/concepts/files/qualitethermique-comparaisonsmateriaux.html>

[POVEDA&LIPSETT,2011]article a review of sustainability assessment and sustainability/environmental rating systems and credit weighting tools december 2011 [journal of sustainable development](#) 4(6):36-55 <https://www.researchgate.net/>

[POHEKAR&RAMACHANDRAN,2004] Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning--A review https://econpapers.repec.org/article/eeerensus/v_3a8_3ay_3a2004_3ai_3a4_3ap_3a365-381.htm

[RAPPORT SUR LA SITUATION MONDIALE DES BATIMENTS ET DE LA CONSTRUCTION EN 2020]

Les émissions de CO2 du secteur des bâtiments ont atteint un niveau sans précédent.

Part mondiale des bâtiments et de la construction dans la consommation finale d'énergie et les émissions (2019) ;

[ROBERT, J. 2008] Fabas Laurent, *Guide de la maison économe*. La solution écologique, Ed Eyrolles, Paris, 200p.

[ROY&BOUYSSOU,1993] ARTICLE aide multicritère à la décision : méthodes et cas série : production et techniques quantitatives appliquées à la gestion <https://www.researchgate.net>

[ROY. B ET BERTIER. P, 1973] La méthode Electre II, une application au média planning, communication présentée à la 6ème conférence Internationale de R. O, Dublin Aout 1972, in M. Ross (ed), OR 72, north Amesterdam.) Roy, B. (1978). electre III : un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. 20(1):3–24.

[Recyconsult, 2010] Désigne un paramètre qui exprime le rapport entre l'effet utile et l'énergie consommée <https://www.dictionnaire-environnement.com/>

[ROY ET SKALKA,1984] ELECTRE IS : Aspects méthodologiques et guide d'utilisation. LAMSADE, Unité associée au CNRS no 825, Université de Paris Dauphine. 14

[RESEARCHGATE GMBH2008-2022] la source thermale de hammam debagh <https://www.researchgate.net>

[SOURCE DES DONNEE PERSPECTIVE MONDIALE, 2020] Évaluation de la population totale Algérie (1960-2020) <https://perspective.usherbrooke.ca/>

[SIBEL RAQUEL ERSOY, JULIA TERRAPON-PFAFF, 2021] le système énergétique de l'algérie, développement d'un modèle de phases pour une transformation durable <https://mena.fes.de/fr/projets/climat-et-energie>

[SILAMP FRANCE, 2021] fabricant d'éclairage led pour particuliers et professionnelles <https://www.silamp.fr/combien-de-lumens-par-m2-c1200x66474>

[SELECTRA, 2021] les émissions de co2 par source d'énergie, <https://climate.selectra.com/>

[Salomon, et al, 2004] La maison des Négawatts : Le guide malin de l'énergie chez soi. Mens : Terre vivante .

[SERGE BELLUT,2002].livre les processus de la décision : démarche , méthode et outil, edited by AFNOR .Saint-Denis-la-plaine -2002

[SYAF RIDA HAFNI SAHIR ,2017] Simple Additive Weighting Method to Determining Employee Salary Increase Rate
Department of Management, Universitas Medan Area, Medan, Indonesia

[SAATY, T. L. 1990] : Fundamental of the Analytic Network Process.
Pittsburgh, University of Pittsburgh, USA.

[SOFIANE RAHMOUNI, 2020] évaluation et amélioration énergétique de bâtiment dans le cadre du programme national d'efficacité énergétique thèse pour l'obtention du diplôme de docteur en science , universite mostepha ben boulaïd-batna2 institut d'hygiene et securite , laboratoire de recherche en prevention industrielle (lrp)

[SALIHA ,2014] énergie fossiles, l'algérie 18ème réserve mondiale <https://www.algerie360.com> , économie algérie

[TOTAL ENERGIES, 2020] l'efficacité énergétique des bâtiments
<https://www.totalenergie.fr>

[TAMBA CAMARA ,2018] retour d'expérience pour l'évaluation des risques dans les bâtiments performance en zone aéroportuaire, en vue de l'obtention de doctorat de l'université de toulouse

[TOUT SUR L'ISOLANT ,2019] la nature de l'isolant utilisée

<https://www.toutsurlisolation.com/>

[xpair] la définition de La performance énergétique (www.xpair.com).

[Yves. Robillard ,2011] Guide vers un bâtiment durable : les équipements et solutions d'efficacité énergétique.

[YANG 2010] a method of identifying and weighting indicators of energy efficiency assessment in chinese residential buildings energy policy 38 (2010) 7687–7697