جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم ظهر المهراز فاس
FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MAHRAZ FES

N° d'ordre : 112/23

Centre des Etudes : ***Sciences et Techniques et Sciences Médicales***

Formation Doctorale : ***Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable***

Discipline : **Chimie** (Sciences de l'environnement)

Spécialité : **Génie de l'Environnement et Développement Durable**

Laboratoire : Laboratoire de Matériaux, Procédés, Catalyse, et Environnement

THÈSE DE DOCTORAT

Développement d'un référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments résidentiels au Maroc

Soutenue publiquement par :

Redouan ASSADIKI

Le 27/12/2023, devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Pr. ZERROUQ Farid	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Président
Pr. ELFEZAZI Said	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Safi	Rapporteur
Pr. LAAROUSSI Najma	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Salé	Rapporteuse
Pr. MOURAD Youssef	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Rapporteur
Pr. EL OUARGHI Hossain	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Al-Hoceima	Examinateur
Pr. RAIS Zakia	PES	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz	Examinatrice
Pr. MERLIN Gérard	Professeur émérite	LOCIE, UMR 5271, Université Savoie Mont Blanc-France	Examinateur
Pr. BELMIR Fouzi	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2023-2024

Dédicace

Grâce à dieu tout-puissant, je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de présente thèse plus particulièrement :

À mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, de leurs sacrifices, de leur patience, ainsi que pour leurs conseils.

Mes deux sœurs SARAH & KOUATAR que j'aime très fort et auxquels je souhaite une longue vie pleine de réussite et de bonheur.

Mes familles : ASSADIKI, SALHI, pour leur persévérance et encouragement

Je dédie spécialement ce travail à mon oncle Ali, que la miséricorde d'Allah soit sur lui, ainsi qu'à ses enfants, Amjad et Aya.

Tous mes professeurs, qui ont illuminé mon chemin académique de leurs enseignements, de leur soutien indéfectible et de leur précieuse guidance.

Tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Tous mes collègues, mes ami(e)s.

Soit A un succès dans la vie. Alors A = x + y + z, où x = travail, y = patience, z = croyance.

ASSADIKI Redouan

Remerciements

Les années d'études doctorales représentent pour moi une période mémorable et précieuse. J'adresse, tout d'abord, mes plus vifs remerciements au **Professeur Fouzi BELMIR**, directeur de cette thèse, qui m'accueilli chaleureusement au sein de laboratoire LMPCE à EST-Fès, qui m'a témoigné son soutien, son expérience et m'a encouragé tout au long de l'élaboration de cette thèse. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au **Professeur Gérard MERLIN** du Laboratoire Procédés Energie Bâtiment (LOCIE), UMR 5271, Université Savoie Mont Blanc de France. Ses précieuses suggestions en matière d'analyse des données et des commentaires pour mes écrits académiques. Mes remerciements particuliers vont au **Professeur Hervé BOILEAU** et à la **Professeure Catherine BUHE** pour leur aimable aide et ses commentaires perspicaces dans mes recherches et m'encourage tout au long de mon travail de recherche. Merci pour vos conseils avisés, votre supervision attentive, ainsi que pour votre patience et chaleureuses bienveillances lors de mes séjours à LOCIE.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude au **« Panel d'experts »** qui ont généreusement participé au questionnaire A, à l'enquête Delphi et à l'AHP, me permettant d'atteindre les principaux objectifs de cette étude. Leurs contributions, leur temps et leurs efforts ont été d'une grande valeur lors de la réalisation du travail de l'enquête qui a rendu cette étude possible. Mes remerciements également aux propriétaires et maîtres d'ouvrage des deux bâtiments « DEFI » et « Autonome » pour le partage des données. Cependant, je tiens particulièrement à exprimer ma gratitude envers les experts en bâtiments verts interviewés, à savoir M. Zakaria SADIK, Mme. Wiam SAMIR et M. Abderrahim EL BOUAZOULI, ainsi qu'à tous ceux qui ont partagé leurs connaissances et leur expérience.

Je remercie tous les membres du jury pour leur présence assidue et leur lecture attentive de ma thèse. Je souhaite adresser mes remerciements particuliers à chacun d'entre vous pour vos remarques judicieuses et vos questions pertinentes. Un grand merci au **Pr. ELFEZAZI Said**, **Pr. LAAROUSSI Najma** et **Pr. MOURAD Youssef** pour avoir accepté la charge de rapporter ce travail. Mes remerciements vont également au **Pr. EL OUARGHI Hossain**, **Pr. RAIS Zakia** et **Pr. MERLIN Gérard** et un grand honneur au président de jury **Pr. ZERROUQ Farid**. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers **les secrétaires** de l'école doctorale « Sciences et Techniques et Sciences Médicales » de la FSDM ainsi qu'au **Mr. Pierre BOULAND**, le gestionnaire du laboratoire LOCIE.

Un chaleureux merci à **mes collègues** du laboratoire LMPCE que j'ai eu plaisir de rencontrer tout au long de mon parcours doctoral. Ma reconnaissance s'étend également à **tous mes ami(e)s**, notamment Abdel Aziz, Naoufal, Ahmed, Aissam, Taleb, Fatima et Meryem.

Enfin et surtout, ma sincère gratitude et ma profonde appréciation sont transmises à **ma famille** pour sa motivation et ses encouragements. Des remerciements particuliers vont à **mon père** et à **ma mère**, qui ont toujours prié pour moi et m'ont encouragé à atteindre mes objectifs.

Résumé

Le secteur de la construction des bâtiments au Maroc, connaît une croissance considérable (2100000 unités du logement social pour la période 2010-2023) et la création de villes nouvelles. Les bâtiments, en raison de leur construction et leur utilisation, ont un impact considérable sur la dégradation de l'environnement. Ce constat a conduit au concept de « Bâtiment vert », relativement récent au Maroc. Cette émergence du bâtiment vert nécessite la mise en place d'une réglementation appropriée et des référentiels d'évaluation et de certification des bâtiments verts. Cependant, l'adoption et la mise en œuvre de ce concept « Bâtiment vert » connait une certaine réticence liée à plusieurs obstacles dans la plupart des pays en développement, en particulier pour le Maroc. De plus, les référentiels internationaux existants, tels que : BREEAM, LEED et HQE semblent inadaptés aux pays en développement. Une approche méthodologique mixte (quantitative et qualitative) a été adoptée. Les données ont été collectées à l'aide d'une analyse scientométrique, enquête par questionnaire, entretien non structuré et des études de cas.

Les résultats de l'analyse scientométrique révèlent une augmentation de la production scientifique sur la thématique des bâtiments verts depuis l'année 2010 au niveau de la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA). Les contributions les plus significatives à la recherche sur la durabilité des bâtiments ont été publiées principalement par les pays de l'Arabie saoudite (27 articles), des Émirats arabes unis (16) et de l'Iran (15). En revanche, les laboratoires de recherche au Maroc n'ont publié que deux articles liés à la thématique « Bâtiment vert ». Cela montre que le concept « Bâtiment vert » au Maroc est encore à ses débuts. Ceci est d'autant, confirmé par le faible nombre des bâtiments verts certifiés au Maroc entre 2014-2022 (65 HQE, 8 LEED et 1 BREEAM) et l'absence d'une réglementation spécifique au bâtiment vert. Un sondage de 167 participants représentant quatre groupes de professionnels de différentes régions du Maroc, a permis d'en identifier 12 obstacles et 16 moteurs. Parmi les obstacles critiques identifiés, on citera notamment : B2. « Manque de soutien gouvernemental », B7. Complexité du projet » et B4. « Coûts d'investissement élevés ». En ce qui concerne les principaux moteurs pour les surmonter, on peut mentionner M3 « Réglementation complète du bâtiment vert » incite les acteurs du secteur bâtiment à intégrer des exigences et les standards auxquels les bâtiments doivent se conformer pour être considérés comme durables. Ainsi que le moteur M11. « Incitations financières et non financières » pour encourager les acteurs de la construction à s'engager dans des projets verts.

Dans la deuxième partie de la thèse, nous avons élaboré un référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments résidentiels (*Building Sustainability Assessment Framework* : BuSAF) basé sur les trois piliers de développement durable (« Environnemental », « Social » et « Economique »). Afin de sélectionner les catégories d'évaluation les plus pertinentes, deux tours de questionnaire ont été

réalisé par la technique Delphi. Les catégories clés possédant un niveau d'importance élevé (≥ 3.50) ont été retenues pour élaborer le référentiel BuSAF, constituant 7 catégories environnementales, 3 catégories économiques et 3 catégories sociales contrairement aux référentiels existants (HQE, BREEAM, Mostadam, etc.) qui se concentrent sur le pilier environnement.

Dans la suite du travail de cette thèse, nous avons choisi de se focaliser sur le pilier environnemental du référentiel BuSAF. La troisième phase a consisté en une analyse hiérarchique (AHP) permettant de déterminer les coefficients de pondération des 7 catégories et des 29 sous-catégories environnementales. Les résultats obtenus ont mis en évidence que l'« Efficacité énergétique » était classée comme la catégorie la plus importante avec 24 % du poids, suivie de près par la catégorie « Eau » avec 19.50 %, suivie par « Site et écologie » avec 13.90 %. La pondération la plus faible a été attribuée à la catégorie « Gestion des déchets solides » avec 8.20 %. En parallèle, pour chaque sous-catégorie, nous avons élaboré des fiches descriptives pour chaque critère d'évaluation correspondant. L'évaluation des différents critères des sous-catégories et des catégories du référentiel BuSAF(Env), ainsi élaborée permettra une classification de chaque bâtiment résidentiel évalué en cinq niveaux : « Non classé », « Acceptable », « Bon », « Excellent » et « Exceptionnel».

Afin de tester le référentiel BuSAF(Env), il a été appliqué sur deux maisons marocaines modernes se distinguant en termes de localisation et de modèle de construction : d'une part, un bâtiment dit « Autonome » à Rabat avec un score de performance 69.33 % classé « Bon », et d'autre part le bâtiment « DEFI » à Tafrouat ayant obtenu un score de 17.33 % (Non classé). L'analyse des résultats de ces deux études de cas souligne que le bâtiment « DEFI » met surtout l'accent sur la performance énergétique, tandis que les autres aspects présentent des performances insuffisantes en raison d'une conception non durable. Ensuite, les résultats de deux études de cas basées sur le référentiel BuSAF(Env) ont été comparés aux évaluations obtenues à l'aide de trois principaux référentiels internationaux : HQE, LEED et BREEAM (Approche multi-évaluation). Les résultats de cette comparaison ont montré une convergence avec la multi-évaluation pour les deux bâtiments « DEFI » et « Autonome », à l'exception de la catégorie « Pollution ». Cette divergence est principalement due à des différences dans la méthode d'évaluation et l'échelle de notation.

En conclusion, les résultats de ce travail de thèse ont permis de contribuer à une meilleure compréhension du concept « Bâtiment durable » dans le contexte marocain, ainsi que la proposition d'un projet du référentiel adapté pour l'évaluation de la durabilité des bâtiments résidentiels au Maroc. Enfin, ce travail recommande un certain nombre d'actions et de mesures à déployer au niveau national afin de favoriser l'émergence et le développement des bâtiments verts.

Mots-clés : Bâtiment vert, Triple Bottom Line, obstacles, moteurs, Building Sustainability Assessment Framework, analyse scientométrique, Delphi, AHP, Moyen-Orient et Afrique du Nord, Maroc.

Abstract

The construction of buildings in Morocco is expanding considerably (2,100,000 social housing units for the period 2010-2023) along with the development of new cities. The construction and utilization of buildings have a significant environmental impact. This has led to the emergence of the "Green Building" concept, a relatively recent development in Morocco. The emergence of green building necessitates the implementation of regulations and the deployment of assessment and green building certification tools. However, there is a reticence to adopt and implement the "green building" concept, due to several obstacles in most developing countries, particularly Morocco. As well as the certification tools (e.g., BREEAM, LEED and HQE) not developed initially to be appropriate for developing countries.

The aim of this thesis is to establish the current state of green buildings in Morocco and to develop a sustainability assessment framework for residential buildings (BuSAF). This framework aims to evaluate the sustainability of buildings based on the principle of the three pillars of sustainable development (Triple Bottom-Line). The research employs a mixed methodological approach combining quantitative and qualitative methods. Data collection implicates scientometric analysis, questionnaire surveys, unstructured interviews, and case studies.

The results of the scientometric analysis indicate a significant increase in scientific publication “Green building” topic in the Middle East and North Africa (MENA) since 2010. The most significant contributions from Saudi Arabia (27 papers), the United Arab Emirates (16 papers), and Iran with 15 articles. In contrast, research institutions in Morocco have published only two articles on the subject of "Green Building". This underscores the "Green Building" concept in Morocco is still in its early stages of development. This is further confirmed by the limited number of certified green buildings (65 HQE, 8 LEED, and 1 BREEAM) from 2014 to 2022 and the absence of green building regulations. To identify the different factors influencing the development of buildings in Morocco. Through a survey of 167 participants from various regions in Morocco, we identified 12 barriers and 16 driving factors. “B2. Lack of government support", "B7. Complexity of projects" and "B4. High investment costs" emerged as critical barriers identified by most of the professional groups of participants. The main drivers for overcoming the obstacles include D3 " Regulation of green building" promotes the integration of requirements and standards that buildings must conform with to be sustainable. Additionally, the driver D11. "Financial and non-financial incentives" aimed at encouraging stakeholders in the building sector to engage in green projects.

In the second part of the thesis, we proposed a sustainability assessment framework for residential buildings (*Building Sustainability Assessment Framework* (BuSAF)). This framework is based on the three pillars of sustainable development: environmental, social, and economic. Initially, we conducted a comparative study of existing GBRS to select the most relevant evaluation categories. The second

phase consisted of a questionnaire survey (in two rounds) based on the Delphi technique. The aim was to establish a consensus among the members of the panel of Moroccan experts on the classification of the categories. The key categories with a high level of importance (≥ 3.50) were selected to develop the BuSAF framework. The BuSAF represents a benchmark based on a holistic approach, with 7 environmental categories, 3 economic categories and 3 social categories, in contrast to the existing frameworks (HQE, BREEAM, Mostadam, etc.) which focus on the environmental pillar.

In the subsequent phase, we have opted to focus on the environmental pillar of the BuSAF framework. The third phase consisted of a hierarchical analysis (AHP) to determine the weighting coefficients for the 7 environmental categories and 29 sub-categories. The results demonstrated that “Energy Efficiency” was ranked as the most important category with 24 % of the weight, followed by “Water” with 19.50 %, “Site Sustainability” with 13.90 %. The lowest weighting was given to the "Solid waste management" category, with 8.20 %. Parallel to this, for each sub-category, we have created descriptive sheets for each corresponding evaluation criterion. The evaluation of the various criteria of the sub-categories and categories of the BuSAF(Env) framework will result in a classification of each residential building evaluated in five levels: "Not classified", "Acceptable", "Good", "Excellent" and "Exceptional".

The BuSAF(Env) assessment framework was applied to two modern Moroccan houses that are distinct in terms of location and construction model. The building “Autonome” attained a performance score of 69.33 % (Good), compared with the second building “DEFI”, which scored 17.33 % (Not classified). The analysis highlights that the building “DEFI” focuses mainly on energy performance, while the other aspects perform poorly due to unsustainable design.

The results of two case studies based on the BuSAF(Env) were compared with the assessments of three international rating systems: HQE, LEED, and BREEAM (multi-assessment approach). The objective was to validate the extent of alignment or disparity between BuSAF(Env) and the other Green Building Rating systems (GBRS). The results of this comparison revealed alignment in the multi-assessment for the two buildings "DEFI" and "Autonomous", except for the "Pollution" category.

To conclude, the findings of this thesis have contributed the comprehension of the "sustainable building" concept in the Moroccan context. As well as to the proposal of a draft reference framework adapted to the evaluation of the sustainability of residential buildings in Morocco. Finally, this thesis suggests specific actions and recommendations to promote the adoption of green buildings.

Keywords: Green building, Triple Bottom Line, barriers, drivers, Building Sustainability Assessment Framework, scientometric analysis, Delphi, AHP, Middle East and North Africa, Morocco.

خلاصــة عامــة

يشهد قطاع البناء في المغرب نموا متسارعا يقدر ب 2.100.000 وحدة سكنية من السكن الاقتصادي وذلك على الأقل في الفترة الممتدة ما بين: 2010-2023 مع إنشاء مدن جديدة. تساهم عملية إنشاء البنايات واستغلالها بشكل كبير في تدهور المحيط البيئي مما عجل بظهور مفهوم "المباني الخضراء"، الحديث نسبيا في المغرب. يتطلب تطوير المباني الخضراء وضع معايير مناسبة لتقييم وإصدار الشهادات للمباني الخضراء. ومع ذلك، فإن اعتماد وتنفيذ مفهوم "المباني الخضراء" يواجه بعض التردد المرتبط بعدة معيقات في معظم البلدان النامية، وخاصة في المغرب. علاوة على ذلك فإن الأنظمة الدولية لتقييم المباني الخضراء، مثل: LEED-BREEAM-HQE مصممة خصيصا لتلائم بلدا أو منطقة معينة ولن تكون قابلة للتطبيق في مناطق أخرى.

تهدف هذه الأطروحة إلى تحديد واقع المباني الخضراء في المغرب واقتراح نظام لتقييم استدامة المباني السكنية (BuSAF)الذي يقوم على الركائز الثلاث للتنمية المستدامة (النمو الاقتصادي وحفظ الموارد الطبيعية والبيئة والتنمية الاجتماعية) باعتماد المنهج المختلط والمتكامل (الكمي والنوعي) عن طريق استخدام التحليل ا السيتومتري ، و الاستبيان، والمقابلة غير الشكلية ودراسات الحالة، حيث كشفت نتائج التحليل السيتومتري (Analyse scientométrique) تقدما ملحوظا في البحث العلمي حول موضوع المباني الخضراء منذ عام 2010 في منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، إذ تم نشر أهم المساهمات في البناء المستدام من قبل المملكة العربية السعودية (27 مقالاً)، والإمارات العربية المتحدة (16) وإيران (15) .في المقابل، لم تنشر مختبرات الأبحاث في المغرب سوى مقالتين تتعلقان بموضوع "المباني الخضراء، " مما يدل على أن هذا المفهوم لا يزال في بداياته . يتأكد هذا الأمر بشكل أكبر من خلال العدد المحدود للمباني الخضراء المعتمدة في المغرب بين عامي 2014 و2022 بأربعة وسبعين مشروعا كالتالي: خمسة وستون مشروعا معتمدا على نظام HQE، ثمان مشاريـع تبنت نظام BREEAM ومشروع واحد بنظام LEED.

في الواقع، لا يزال تطوير المباني الخضراء في المغرب يواجه العديد من الصعوبات، على الرغم من كل المزايا البيئية والاقتصادية والاجتماعية التي يقدمها .ومن أجل فهم العوامل المختلفة التي تؤثر على تطور المباني في المغرب، مكنت دراسة استقصائية شملت 167 مشاركا يمثلون أربع مجموعات من مهنيي البناء من مختلف مناطق المغرب، من تحديد إثنتي عشر عائقا وستة عشر دافعا لتخطي التحديات. من بين أهم تلك المعيقات سنذكر على وجه الخصوص: "م2. نقص الدعم من طرف المؤسسات الحكومية"، "م7 .تعقيدات في انجاز المباني الخضراء" و"م4. ارتفاع تكاليف البناء". وفيما يتعلق بالدوافع الرئيسية للتغلب عليها، يمكننا ذكر «د3. الترسانة القانونية للأبنية الخضراء" التي ستدفع الفاعلين في قطاع البناء إلى دمج المعايير التي يجب أن تمتثل لها المباني حتى تعتبر مستدامة .وكذلك "د11. حوافز مالية وغير مالية" للتشجيع على الانخراط في المباني الخضراء.

في ما يخص الجزء الثاني من الأطروحة، قمنا بتطوير نظام لتقييم استدامة المباني السكنية Building (Sustainability Assessment Framework: BuSAF) الذي يستند على الركائز الثلاثة للتنمية المستدامة ("البيئية" و"الاجتماعية" و"الاقتصادية") .

في المرحلة الأولى، تم إجراء دراسة مقارنة للأنظمة الحالية من أجل اختيار فئات التقييم الأكثر صلة بالموضوع، بينما اشتملت المرحلة الثانية على مسح الاستبيان (في جولتين) على أساس تقنية دلفي (Delphi) من أجل التوصل إلى توافق

حول تصنيف مجالات الإطار بين أعضاء لجنة الخبراء المغاربة للبناء الأخضر.كما تم الاعتماد على الفئات الرئيسية ذات المستوى العالي من الأهمية (3.50≤) لإنجاز نظام BuSAF المشتمل على سبع مجالات بيئية، وثلاث مجالات اقتصادية، و ثلاث مجالات اجتماعية على عكس المعايير الحالية (المستدام، HQE, BREEAM) التي ترتكز على المعايير البيئية فقط.

وفي بقية محاور الأطروحة، اخترنا التركيز على المعايير البيئية لنظام BuSAF .حيث خصصنا المرحلة الثالثة للتحليل الهرمي (AHP) من أجل تحديد معاملات المجالات السبع و وتسعة وعشرين فئة فرعية .وأظهرت النتائج المتوصل إليها أن "كفاءة الطاقة" جاءت كأهم مجال بنسبة 24% من المعاملات، تليها مباشرة فئة "المياه" بنسبة 19.50%، وبعدها فئة "الموقع والبيئة" بنسبة 13.90%. أما أقل ترجيح فكان لفئة "إدارة النفايات الصلبة" بنسبة 8.20 %. في الوقت نفسه، قمنا ، على مستوى كل فئة فرعية، بإنجاز بطاقات وصفية لكل معيار تقييم، بحيث تحتوي على تفاصيل الفحص والتقييم، سيسمح بتصنيف كل مبنى سكني إلى خمسة مستويات: "غير مصنف"، "مقبول"، "جيد"، "ممتاز" و"استثنائي."

من أجل اختبار النظام المقترح (BuSAF(Env، تم تطبيقه على منزلين مغربيين حديثين يتميزان من حيث الموقع ونموذج البناء : من جهة ، مبنى يسمى "الذاتي" بالرباط بنسبة أداء 69.33% مصنف "جيد"، ومن جهة أخرى حصل مبنىDEFI بتافراوت على درجة 17.33% (غير مصنف) . ويسلط تحليل نتائج دراستي الحالة، الضوء على أن مبنى "DEFI"يركز بشكل أساسي على أداء الطاقة، في حين أن الجوانب الأخرى غير كافِية بسبب التصميم غير المستدام. بعد ذلك، تمت مقارنة نتائج دراسة حالة استنادًا إلى معيار (BuSAF(Env مع التقييمات التي تم الحصول عليها ، باستخدام ثلاث أنظمة دولية:HQE، LEED وBREEAM وذلك من أجل التحقق من طبيعة ودرجة التقارب أو الاختلاف بين (BuSAF(Env وهذه الانظمة الثلاث. بحيث أظهرت نتائج المقارنة التقارب مع التقييم المتعدد للمبنيين "DEFI" و" الذاتي"، باستثناء مجال "التلوث". ويرجع هذا التناقض بشكل رئيسي إلى الاختلافات في طريقة التقييم ومقياس التصنيف.

وأخيرا، يوصي هذا العمل بعدد معين من الإجراءات والتدابير التي سيتم نشرها على المستوى الوطني من أجل تعزيز ظهور وتطوير المباني الخضراء.

الكلمات الدالة: المباني الخضراء، الحد الأدنى الثلاثي(TBL) ، المعيقات، الدوافع، نظام تقييم استدامة البناء، التحليل السيومتري، دلفي، AHP، الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، المغرب.

Table des matières

Dédicace ..... **I**

Remerciements ..... **II**

Résumé ..... **III**

Abstract ..... **V**

خلاصة عامة ..... **IX**

Liste des figures ..... **XIV**

Liste des tableaux ..... **XVI**

Liste des équations ..... **XVII**

Acronymes ..... **XVIII**

INTRODUCTION GÉNÉRALE **1**

1.1. Mise en contexte de la thèse 1

1.2. Définition de la problématique 2

1.3. Objectifs de la recherche 3

1.4. Hypothèse de la recherche 4

1.5. Méthodologie de la recherche 4

1.6. Considérations éthiques 8

PARTIE 1 : ÉTAT DES LIEUX ET DES PARADIGMES DE DÉVELOPPEMENT DES BÂTIMENTS VERTS AU MAROC **9**

Aperçu de la partie 1 ..... **10**

CHAPITRE 1 : Analyse scientométrique et revue de la littérature sur la durabilité des bâtiments **10**

1.1. Introduction 10

1.2. Méthodologie 11

1.3. Résultats et discussions 12

1.3.1. Concept du bâtiment durable 12

1.3.2. Dimension de la durabilité des bâtiments 15

1.3.3. Performance des bâtiments dans une perspective de cycle de vie 17

1.3.4. Tendance de publication annuelle 21

1.3.5. Contribution des pays/territoires 22

1.3.6. Tendances des publications de recherche en GB par source de documents 23

1.3.7. Analyse des citations de documents 24

1.3.8. Principaux domaines de recherche 25

1.3.9. Réseaux de collaboration scientifique dans GB 27

1.4. Résumé 29

CHAPITRE 2 : État des lieux des bâtiments verts à l'échelle nationale 30

2.1. Introduction 30

2.2. Engagement à l'échelle internationale en bâtiment vert 30

2.2.1. Réglementation thermique des bâtiments 30

2.2.2. Normalisation internationale relative aux bâtiments verts 31

2.2.3. Codes nationaux en termes des bâtiments verts 32

2.3. Engagement du Maroc en matière de développement durable et du changement climatique dans le secteur du bâtiment 34

2.3.1. Maroc : données nationales 34

2.3.2. Stratégie nationale de développement durable 39

2.3.3. Engagements du Maroc dans le cadre de la CCNUCC 39

2.3.4. Acteurs de la construction durable au Maroc 41

2.3.5. Réglementation nationale 42

2.3.6. Enseignement et la formation professionnelle 46

2.4. Déploiement de la certification verte dans le secteur du bâtiment 47

2.5. Résumé 51

CHAPITRE 3 : Obstacles et moteurs de développement des bâtiments verts avec une étude comparative 52

3.1. Introduction 52

3.2. Méthodologie de l'enquête 52

3.2.1. Forme du questionnaire 53

3.2.2. Étude pilote 53

3.2.3. Administration de l'enquête 54

3.2.4. Tests statistiques pour l'analyse des données 54

3.3. Données démographiques des répondants 55

3.4. Analyse de la hiérarchisation des obstacles de développement des bâtiments verts 56

3.4.1. Analyse descriptive des résultats 56

3.4.2. Classification les principaux obstacles sur la base du clustering 57

3.5. Analyse de la hiérarchisation les moteurs de développement des bâtiments verts 62

3.5.1. Analyse descriptive des résultats 62

3.5.2. Classification les principaux moteurs sur la base du clustering 63

3.6. Comparaison avec les pays de la région MENA et les pays développés 68

3.7. Résumé 70

Résumé de la partie 71

PARTIE 2 : DÉVELOPPEMENT D'UN RÉFÉRENTIEL D'ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ DES BÄTIMENTS RÉSIDENTIELS DANS LE CONTEXTE DU MAROC 72

Aperçu de la partie 2 73

CHAPITRE 1 : Analyse des systèmes de certification des bâtiments verts 74

1.1. Introduction 74

1.2. Aperçu général 74

1.2.1. BREEAM 75

1.2.2. LEED 76

1.2.3. HQE 76

1.3. Le schéma général des systèmes de certification des bâtiments verts 76

1.3.1. Structure 76

1.3.2. Agrégation 78

1.3.3. Périmètre 78

1.4. Analyse comparative des systèmes de certification des bâtiments verts 78

1.4.1. Analyse longitudinale 79

1.4.2. Analyse horizontale 80

1.4.3. Comparaison les critères d'évaluation de la catégorie « Energie » 83

1.4.4. Processus de certification 84

1.5. Une critique des référentiels existants des bâtiments verts 85

1.5.1. Variation régionale 85

1.5.2. Prise en compte du développement durable 86

1.5.3. Critères d'évaluation 86

1.5.4. Système de pondération 87

1.6. Quelle alternative pour le Maroc ? 87

1.7. Résumé 88

CHAPITRE 2 : Développement d'un référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments résidentiels 89

2.1. Introduction 89

2.2. Modèle conceptuel de BuSAF 89

2.3. Cadre méthodologique 91

2.3.1. Etape (A) : Analyse de la littérature 92

2.3.2. Etape (B) : Consensus d'experts 93

2.3.3. Etape (C) : Hiérarchisation des catégories environnementales du référentiel BuSAF 94

2.3.4. Etape (D) : Etablir un système de pondération 94

2.3.5. Etape (E) : Application et Test 95
2.4. Identifier les catégories du référentiel BuSAF 95
2.4.1. Présentation de la méthode Delphi 95
2.4.2. Résultats et discussions 101
2.4.3. Effet d'expérience professionnelle sur les résultats de classement 107
2.4.4. Référentiel d'évaluation de la durabilité du bâtiment marocain 109
2.5. La hiérarchisation des catégories environnementales de BuSAF(Env) 111
2.5.1. Cadre conceptuel du BuSAF(Env) 111
2.5.2. Sélection des critères environnementaux 112
2.5.3. Développement des fiches descriptives pour les critères d'évaluation 115
2.6. Résumé 120
CHAPITRE 3 : Système de pondération du référentiel BuSAF(Env) 121
3.1. Introduction 121
3.2. Système de pondération applicable au BuSAF(Env) 121
3.2.1. Application de la méthode AHP 121
3.2.2. Elaboration de la hiérarchie 122
3.2.3. Résultats de la pondération 126
3.2.4. Comparaison entre BuSAF(Env) et les GBRS existants 136
3.3. Procédure d'évaluation des bâtiments par BuSAF 138
3.3.1. Processus d'évaluation des bâtiments par le BuSAF 138
3.3.2. Système de classification de la durabilité par BuSAF 139
3.4. Proposition pour la mise en déploiement du BuSAF 140
3.5. Résumé 142
CHAPITRE 4 : Application et test du référentiel BuSAF(Env) 143
4.1. Introduction 143
4.2. Sélection des études de cas 143
4.2.1. Description des bâtiments sélectionnés 144
4.2.2. Collecte de données 145
4.3. Application de BuSAF (Env) 145
4.4. Muti-évaluation des deux bâtiments « DEFI » et « Autonome » 153
4.5. Résumé 162
Résumé de la partie 163

CONCLUSIONS GÉNÉRALES 164
1. Motivations 164
2. Répondre aux objectifs de recherche 164
2.1 Production scientifique sur la thématique « Bâtiment vert » 164
2.2 Etat des lieux des bâtiments verts au Maroc 165
2.3 Obstacles et moteurs associés à l'intégration de la durabilité dans le secteur du bâtiment 165
2.4 Développement d'un référentiel d'évaluation de la durabilité (BuSAF) 165
3. Contribution de la thèse 166
4. Recommandations de la recherche 167
4.1. Proposition d'un cadre de collaboration scientifique 167
4.2. Recommandations pour les principaux acteurs de la construction durable 168
5. Limites et perspectives 169
GLOSSAIRE 171
RÉFÉRENCES 175
ANNEXES 194

Liste des figures

Figure 1 : Modèle conceptuel de la recherche « Oignon-Saunders » 5
Figure 2: Processus de la recherche 7
Figure 3: Cadre méthodologique de l'étude scientométrique 12
Figure 4: Modèles de la durabilité 13
Figure 5: Objectifs de développement durable 14
Figure 6: Modèle de la construction durable développé par CIBTask 15
Figure 7: Nouveau paradigme : du bâtiment conventionnel à durable 16
Figure 8: Phases de cycle de vie du bâtiment selon la norme EN 15978 :2011 18
Figure 9: Evolution de la publication dans la région MENA en terme « Bâtiment vert » de 2000 à 2021 21
Figure 10: Contribution par pays de la région MENA (2000-2021) 22
Figure 11 : Réseau (Total link strength) des revues scientifiques de publication dans la région MENA 23
Figure 12: Réseau de citation des documents dans la recherche GB 24
Figure 13: Carte de visualisation du réseau de co-occurrence des mots-clés 25
Figure 14: Réseau de collaboration dans la région MENA (2000-2021) 28
Figure 15: Carte du réseau de collaboration de 9 tops instituts dans la région MENA 28
Figure 16: Carte du réseau de co-auteurs des pays basées sur les valeurs « Total link strength » 28
Figure 17: Règlement thermique du bâtiment par pays/état 31
Figure 18: Evolution de la consommation d'énergie primaire au Maroc 34
Figure 19: Zonage climatique du Maroc dans le cadre de la RTCM 35
Figure 20: Horaires d'inconfort thermique interne 36
Figure 21: Tableau de bord des 17 ODD au Maroc 37
Figure 22: Catégories des bâtiments résidentiels marocains 38
Figure 23: Chronogramme de l'engagement du Maroc de lutte contre le changement climatique en lien avec le secteur du bâtiment (2009-2023) 40
Figure 24: Nombre de lois et de normes par catégorie au Maroc 43
Figure 25: Projets certifiés selon type du bâtiment (2014-2022) 48
Figure 26 : Classement des villes selon le nombre et la surface des projets certifiés (2014-2022) 49
Figure 27: Régression linéaire entre le PIB et le nombre Des bâtiments certifiés pour les 8 régions. 50
Figure 28: Application des GBRS internationaux par les participants à l'enquête 55
Figure 29: Nombre d'années d'expérience 55
Figure 30. Résultats de l'analyse en clusters hiérarchiques les obstacles de développement des GB 58
Figure 31: Résultats de l'analyse en clusters hiérarchiques les moteurs de développement des GB 64
Figure 32: Distribution des référentiels de certification des bâtiments verts selon l'origine 75

Figure 33: Hiérarchie principale du cadre de certification 77
Figure 34: Structure hiérarchique du système LEED, type résidentiel V4_ BD+C 77
Figure 35: Chronologie du développement des référentiels « Bâtiments verts » 79
Figure 36: Variation les poids des systèmes de certification des nouveaux bâtiments résidentiels 80
Figure 37: Processus de certification des systèmes sélectionnés 84
Figure 38: Niveau d'importance des dimensions de la durabilité dans les neuf GBRS 86
Figure 39: Cadre conceptuel du référentiel d'évaluation BuSAF 90
Figure 40: Importance les TBL selon les phases de vie du bâtiment 91
Figure 41: Approche méthodologique de l'élaboration du référentiel BuSAF 91
Figure 42: Approche de la méthode Delphi 96
Figure 43: Hiérarchisée les étapes d'analyse des données pendant les deux tours de Delphi 98
Figure 44: Influence de l'expérience des participants sur l'ordre de classement pendant le deuxième tour 108
Figure 45: Nombre des catégories affectées à chacun des niveaux d'importance 109
Figure 46: Référentiel du système d'évaluation de durabilité des bâtiments au Maroc (BuSAF) 110
Figure 47: Périmètre spatial des critères d'évaluation 113
Figure 48: Schéma global pour un score final d'un critère/d'indicateur 115
Figure 49: Modèle de la fiche descriptive d'un critère d'évaluation 116
Figure 50: Fonction échelonnée des critères d'évaluation 118
Figure 51: Exemple de la fiche descriptive du critère : réutilisation des zones précédemment construites ou contaminées « Greyfield land » 119
Figure 52: Processus de la pondération par la méthode AHP 122
Figure 53: Données démographiques des experts 126
Figure 54 : Pondération des catégories BuSAF(Env) 127
Figure 55: Comparaison du poids des catégories du BuSAF(Env) et les GBRS 137
Figure 56: Processus de la certification BuSAF 138
Figure 57:Exemple d'évaluation par le référentiel BuSAF 140
Figure 58: Stratégie de la mise en œuvre de BuSAF 141
Figure 59: Paysage dégagé du bâtiment « DEFI » 144
Figure 60: Paysage dégagé du bâtiment « Autonome » 145
Figure 61: Comparaison des scores normalisés de la performance environnementale (BuSAF(Env)) des deux bâtiments (« DEFI » et « Autonome ») 149
Figure 62: Performance environnementale des études de cas de la multi-évaluation 155

Liste des tableaux

Tableau 1: Avantages et limites des méthodes de recherche 6
Tableau 2 : Principaux termes du logiciel VOSviewer 11
Tableau 3: Comparaison de la co-occurrence des mots-clés dans trois contextes 25
Tableau 4 : Systèmes de certifications développées dans la région MENA 27
Tableau 5: Cinq top institutionnel production scientifique en GB 28
Tableau 6: Caractéristiques des bâtiments résidentiels au Maroc 38
Tableau 7: Récapitulatif des mesures d'atténuation préconisées dans le secteur du bâtiment 41
Tableau 8: Acteurs dans le domaine des bâtiments verts au Maroc 42
Tableau 9 : Synthèse de la réglementation nationale en relation avec la thématique « Bâtiments verts » 44
Tableau 10: Projets certifiés selon le niveau de la performance 49
Tableau 11: Liste des obstacles et les moteurs sélectionnés pour le questionnaire 52
Tableau 12 : Profils des répondants 55
Tableau 13: Classement les obstacles à l'adoption des GB au Maroc 56
Tableau 14: Classement les moteurs de l'adoption des GB au Maroc 62
Tableau 15: Cinq principaux obstacles au déploiement des GB au Maroc et dans certains pays 68
Tableau 16: Cinq principaux moteurs au déploiement des GB au Maroc et dans certains pays 69
Tableau 17: Corrélation entre les poids normalisés des catégories et les indicateurs des pays 82
Tableau 18 : Critères énergétiques des GBRS sélectionnés 83
Tableau 19: Inventaire des catégories d'évaluation des GBRS_résidentiel 92
Tableau 20: Liste préliminaire des catégories d'évaluation 93
Tableau 21: Comparaison les techniques de consensus 94
Tableau 22 : Coefficient CV et le niveau de consensus 99
Tableau 23 : Valeurs limite de l'équation d'IRA 100
Tableau 24 : Profils des experts pendant les deux tours de Delphi 101
Tableau 25 : Analyse de la fiabilité pendant les deux questionnaires de Delphi 102
Tableau 26 : Classement des catégories de durabilité pendant le premier tour de Delphi 104
Tableau 27 : Niveau d'importance des catégories et de concordance chez le panel d'expert 106
Tableau 28: Critères d'évaluation environnementale du système BuSAF(Env) 113
Tableau 29: Exemples des méthodes d'évaluation du critère « Choix du site » 117
Tableau 30: Méthode de notation les critères du BuSAF 118
Tableau 31: Exemple d'une comparaison par paires (Catégorie : Site et écologie) 123
Tableau 32 : Matrice de comparaison par paires (participant N°1) 123
Tableau 33 : Matrice de comparaison par paire (15 participants) 124

Tableau 34: Normalisation de la matrice AHP des sept catégories 124
Tableau 35: Exemple de calcul λ (max) pour le participant N° 1..... 125
Tableau 36: Indice d'incohérence aléatoire (R.I.) 125
Tableau 37: Pondération des sous-catégories « Efficacité énergétique » 128
Tableau 38: Pondération des sous-catégories « Eau » 129
Tableau 39: Pondération des sous-catégories « Site et écologie »..... 130
Tableau 40: Pondération des sous-catégories « Matériaux de construction »..... 131
Tableau 41: Pondération des sous-catégories « Gestion des risques » 132
Tableau 42: Pondération des sous-catégories « Pollution »..... 133
Tableau 43: Pondération des sous-catégories « Gestion des déchets solides »..... 134
Tableau 44: Système de pondération et de notation du BuSAF(Env) 135
Tableau 45: Cinq niveaux de certification BuSAF..... 140
Tableau 46: Exemple de calcul du score de la catégorie « Eau » du bâtiment « DEFI » par BuSAF(Env)..... 146
Tableau 47 : Résultats de l'évaluation par BuSAF(Env) pour les deux bâtiments (« DEFI » et « Autonome ») .. 147
Tableau 48: Performance environnementale du bâtiment « DEFI » et « Autonome » de la multi-évaluation .. 154

Liste des équations

Eq. 1 Méthode de calcul de la concordance inter-juges (IRA) 100
Eq. 2 Méthode de calcul de la limite infére ieure de l'IRA 100
Eq. 3 Méthode de calcul de la limite supérieure de l'IRA 100
Eq. 4 Méthode de calcul du rapport de cohérence 125
Eq. 5 Modèle du calcul de la durabilité par BUSAF..... 139

Acronymes

ACV : Analyse du Cycle de Vie.
AHP : Analyse Hiérarchique des Procédés.
AMEE : Agence Marocaine d'Efficacité Energétique.
ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
BREEAM: Building Research Establishment Environmental Assessment Method.
BUR : Biennial Update Report.
CBS : Coefficient de biotope.
CCNUCC : Convention-Cadre des Nations unies sur le Changement Climatique.
CDN : Contribution Déterminée au niveau National.
Cluster EMC : Cluster efficacité énergétique des matériaux de construction.
COP : Coefficient de performance
CVC : Chauffage, Ventilation et Climatisation
DD : Développement Durable.
ECS : Eau Chaude Sanitaire.
EER : Ratio d'efficacité énergétique (Energy Efficiency Ratio)
FS : facteur solaire
GABC: Global Alliance for Buildings and Construction.
GB: Bâtiment vert (Green Building).
GBRS : Systèmes d'évaluation des bâtiments verts (Green Building Rating System).
GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.
Hag : Hectare Global
HQE : Haute qualité environnementale.
IMANOR : Institut Marocain de Normalisation.
ISO: International Organization for Standardization.
LCC : Coût du cycle de vie (Life Cycle Costs).
LEED: Leadership in Energy and Environmental Design.
LWD : Demande en eau du paysage (Landscape Water Demand).
BuSAF: Building Sustainability Assessment Framework.
MCDM : Méthodes de prise de décisions multicritères (Multiple-Criteria Decision-Making).
MENA : Moyen-Orient et Afrique du Nord (Middle East and North Africa).
MGBC : Conseil marocain du bâtiment vert (Morocco Green Building Council).
MMM : Maison marocaine moderne.
NAMA : Nationally appropriate mitigation actions.
ODD : Objectifs de développement durable.
PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.
RT : Règlement thermique.
RTCM : Règlement Thermique de Construction au Maroc.
SBM : Syndromes de Bâtiments Malsains.
SNDD : Stratégie Nationale de Développement Durable.
Somb : Surface ombrée.
SRI : Indice de réflectance solaire (Solar Reflectance Index).
SPSS : Statistical Package for the Social Sciences.
TBL : Triple Bottom Line.
TGBV : Taux Global des Baies Vitrées.
USGBC: United State Green Building Council.
VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée.
WF : Water Factor.
WorldGBC: World Green Building Council.
WOS : Web Of Science.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans cette introduction nous présentons une vue d'ensemble de la thèse : le contexte de la recherche, la définition de la problématique étudiée, ainsi que les questions clés posées. Ensuite, nous formulons les objectifs poursuivis et nous étalons les différentes étapes de la démarche, ainsi que de la méthodologique adoptée et l'organisation du présent manuscrit.

1.1. Mise en contexte de la thèse

L'industrie du bâtiment est l'un des secteurs les plus importants en termes de création d'emplois et d'une contribution économique allant de 5 % à 15 % du PIB des pays [1]. Cependant, cette industrie a un impact négatif considérable sur l'environnement. En effet elle consomme 70 % de l'énergie et exploite 40 % des ressources naturelles (sables, graviers et pierres), 25 % du bois et 12-16 % de l'eau [3][4]. Pendant la phase de l'utilisation, les bâtiments génèrent plus de 50 % des déchets mis en décharge et contribuent à 40 % des émissions mondiales de CO_2 [4]. Luo *et al.* (2019)[4] ont calculé l'empreinte carbone des matériaux de construction des différents types de bâtiments en Chine, avec pour les immeubles de bureau avec 514.66 kg CO_2 eq/m^3 et pour les bâtiments commerciaux 533.69 kg CO_2 eq/m^3. En termes de l'empreinte écologique, pour 107 logements en Espagne on a en moyenne 0.385 Hag/an/m². Cela signifie que chaque m² du logement a besoin annuellement d'une superficie de 3850 m² de la Terre avec une productivité moyenne de ressources renouvelables et une capacité d'absorption des déchets [5]. Dans le contexte de l'Inde, on a 0.49 Hag/an/m² [6]. En outre, les matériaux de construction émettent des particules en suspension et des composés organiques volatils qui détériorent la qualité de l'environnement intérieur, ce qui provoque des syndromes de bâtiments malsains (SBM). Gawande *et al.* (2020)[7] ont estimé qu'environ 400 à 1100 des années d'espérance de vie sont perdues (DALY) pour 100000 personnes à cause des SBM en Inde.

Compte tenu de la réalité des pays en développement, notamment une population en plein essor, qui constituera 98 % de la population mondiale d'ici à 2030, dont 40 % devraient vivre dans les villes, ce qui impose davantage de pression sur les ressources naturelles [8]. Au vu de ces circonstances, le mouvement du bâtiment vert (Green building : GB) est devenu une urgence mondiale. De nombreux pays et des organisations gouvernementales et non gouvernementales ont adopté l'approche du GB dans leurs stratégies de développement et leurs objectifs de développement durable. A titre d'exemple, le World Green Building Council (WorldGBC) s'efforce d'atteindre zéro émission de gaz à effet de serre d'ici à 2050 afin de limiter le réchauffement climatique en dessous de 2 degrés Celsius dans le secteur du bâtiment. WorldGBC intègre ainsi les 17 objectifs de développement durable des Nations Unies dans leur engagement. Ce mouvement « Bâtiment vert » repose ainsi sur des normes et des systèmes de certification qui évaluent et reconnaissent la performance environnementale des

bâtiments en efficacité énergétique, la qualité de l'environnement intérieur, les matériaux de construction et autres.

1.2. Définition de la problématique

Une analyse scientométrique par Olawumi *et al.* (2018)[9] et Zhao *et al.* (2019)[10] a mis en lumière le manque de contributions des pays en développement à la recherche sur les bâtiments verts. Cela a été confirmé par l'étude scientométrique dans le continent Afrique par l'équipe Oguntona *et al.* (2021)[11]. Cependant, le dernier rapport de WorldGBC de 2022, seuls l'Afrique du Sud et le Kenya ont établi un Green Building Council (GBC), et cela se développe lentement au Maroc. Il existe peu de recherches sur ce sujet au Maroc, à l'exception de celles portant sur l'efficacité énergétique. En effet, les résultats de la première partie du questionnaire A sur la situation des GB au Maroc, ciblant 167 professionnels des bâtiments tels que les architectes, des ingénieurs, etc. Il est apparu que 40 % considèrent que le mouvement des bâtiments verts vient de commencer au Maroc et plus de 20 % des participants ont jugé que le concept de durabilité dans le secteur du bâtiment n'est pas encore développé. Cela nous conduit à examiner la situation actuelle de développement des bâtiments verts au Maroc, en se situant au niveau de la réglementation nationale et institutionnelle, le déploiement de la certification des bâtiments verts et finalement les offres pédagogiques des formations universitaires en matière de la construction durable. Nous nous sommes intéressés en fin de la première partie de la thèse, aux barrières et aux moteurs relatifs au déploiement de la durabilité dans le secteur du bâtiment.

Pendant ce temps, nous avons porté plus d'attention au moteur M5. « Etablir un système d'évaluation de la durabilité des bâtiments ». En effet, 95 % des participants au questionnaire A ont exprimé l'intérêt de développer un référentiel national d'évaluation de la durabilité des bâtiments. Dès lors, la question se pose : pourquoi développer un référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments dans le contexte du Maroc ?

Les questions d'évaluation de la performance de durabilité des bâtiments font l'objet d'une attention et d'un intérêt croissant, ce qui a entraîné une augmentation du nombre de bâtiments verts certifiés depuis le premier référentiel BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) du Royaume-Uni en 1990. Les certifications poursuivent un objectif global d'améliorer la performance environnementale pendant les phases de vie d'un bâtiment (conception, construction, utilisation, entretien et rénovation). Certains pays développés disposent des systèmes d'évaluation des bâtiments tels que LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) d'États-Unis, HQE (Haute Qualité Environnementale) de la France, DGNB de l'Allemagne, ITACA de l'Italie et bien d'autres. De même, certains pays en voie de développement comme l'Egypte et l'Arabie saoudite ont également développé leurs propres référentiels (GPRS et Mostadam). Ces systèmes de certification

ont été adaptés selon les priorités ainsi que les spécificités (environnementales, économiques, socio-culturelles et réglementaires) de chaque pays, bien que certains référentiels, tels que HQE, BREEAM et LEED aient permis de certifier des projets au-delà des frontières des pays d'origine.

Cependant, comme le soutiennent les auteurs Shad *et al.* (2017)[12] et Vyas *et al.* (2019)[13] que le contexte local a un effet significatif sur les critères d'évaluation et leur importance dans chaque système de certification. Al-Jebouri *et al.* (2017)[14] insistent sur l'impératif d'adapter les référentiels aux contextes socio-culturels, aux ressources naturelles disponibles et aux conditions climatiques locales afin de favoriser la construction durable. Par ailleurs, ces référentiels existants placent des considérations plus consistantes sur les enjeux environnementaux avec une négligence des piliers sociaux et économiques du développement durable [15]–[18], bien que le concept de développement durable se base sur trois piliers (Environnement, économie et social). En conséquence, ces systèmes de certification devraient adopter une approche holistique englobant non seulement les performances environnementales mais également les aspects économiques et sociaux.

1.3. Objectifs de la recherche

Compte tenu de ce qui précède, le présent travail poursuit deux objectifs principaux : d'une part, établir l'état des lieux des bâtiments verts et analyser les paradigmes de leurs développement au Maroc, puis élaborer un référentiel adapté au contexte national pour évaluer les performances de durabilité des bâtiments résidentiels (*Building Sustainability Assessment Framework (BuSAF)*). Ce référentiel devrait être développé de manière à surmonter les lacunes des référentiels existants, en s'appuyant sur une démarche scientifique rigoureuse. Le référentiel BuSAF se base sur les critères d'évaluation adaptés au contexte du Maroc, ainsi qu'un système de pondération.

Pour ce faire, la présente thèse se propose de passer par la série d'objectifs spécifiques suivants :

Objectif 1. Analyse scientométrique : Examiner l'entendue de la recherche scientifique sur la thématique « Bâtiments verts » dans la région Moyen-Orient et Afrique du Nord ;

Objectif 2. Positionnement des bâtiments verts : Déterminer l'état des lieux des bâtiments verts au Maroc ;

Objectif 3. Paradigmes de développement des bâtiments verts : évaluer la criticité des obstacles et les moteurs pour l'intégration de la durabilité au sein de l'industrie du bâtiment ;

Objectif 4. Priorités des catégories de performance : Identifier les catégories de performance cruciales dans le contexte du Maroc pour les trois piliers de la durabilité (Environnement, social et économique) ;

Objectif 5. Critères et seuils des différents indicateurs d'évaluation (Pilier « Environnement ») : Etablir les critères et les seuils d'évaluation pour chacun des indicateurs d'évaluation du référentiel BuSAF

en se limitant aux catégories et sous-catégories du pilier « Environnement », en concordance avec le contexte marocain ;

Objectif 6. Système de pondération : Elaborer un système de pondération relatif aux sous-catégories et catégories pour le pilier « Environnement) du référentiel BuSAF ;

Objectif 7. Modèle d'évaluation : Elaborer un processus d'évaluation des performances des bâtiments résidentiels ;

Objectif 8. Application et test du référentiel BuSAF(Env) proposé.

1.4. Hypothèse de la recherche

L'élaboration du référentiel BuSAF repose sur l'hypothèse principale que les référentiels internationaux, notamment BREEAM, HQE et LEED, n'ont pas été suffisamment adaptés pour prendre en compte les spécificités et le contexte environnemental et socioculturel marocain. Cette limitation englobe un manque de reconnaissance des variations régionales relative aux différents aspects de la durabilité.

Afin de cerner la problématique de cette thèse, une réflexion approfondie a été menée pour définir les questions de recherche (QR) pertinentes suivantes auxquelles doit répondre le présent travail de recherche :

QR 1 Le Maroc est-il sur la bonne voie pour déployer la durabilité dans l'industrie du bâtiment ?

QR 2 Quels obstacles entravent l'adoption des bâtiments verts au Maroc et quel est leur niveau d'importance ? Y a-t-il des différences statistiquement significatives dans la perception de l'importance/la gravité de ces obstacles auprès des professionnels du secteur ?

QR 3 Quelles stratégies sont-elles nécessaires pour surmonter les obstacles et exploiter les opportunités dans le contexte du Maroc ?

QR 4 Quelles catégories et quels critères sont pertinents et appropriés pour évaluer la durabilité des bâtiments au Maroc ?

QR 5 Comment doit-on pondérer les différents catégories et sous-catégories et établir des seuils de performance qui reflètent les spécificités du contexte national ?

1.5. Méthodologie de la recherche

La méthodologie de recherche implique une démarche rigoureuse, basée sur des principes philosophiques, qui guide la conception de la recherche afin qu'elle atteigne valablement et de manière fiable les objectifs de la thèse. La littérature révèle plusieurs modèles de recherche, parmi lesquels nous avons choisi le modèle de l'oignon développé par Saunders *et al.* (2016)[19]. Ce modèle offre une orientation claire pour organiser la recherche de manière appropriée par une série d'étapes allant de la philosophie de recherche aux techniques de collecte de données. Comme l'illustre la figure 1, ce modèle comporte six étapes de l'extérieur vers l'intérieur, chaque couche représente une variété

de philosophie de la recherche, d'approches, de méthodes, de stratégies, horizon temporel et de techniques de collecte de données.

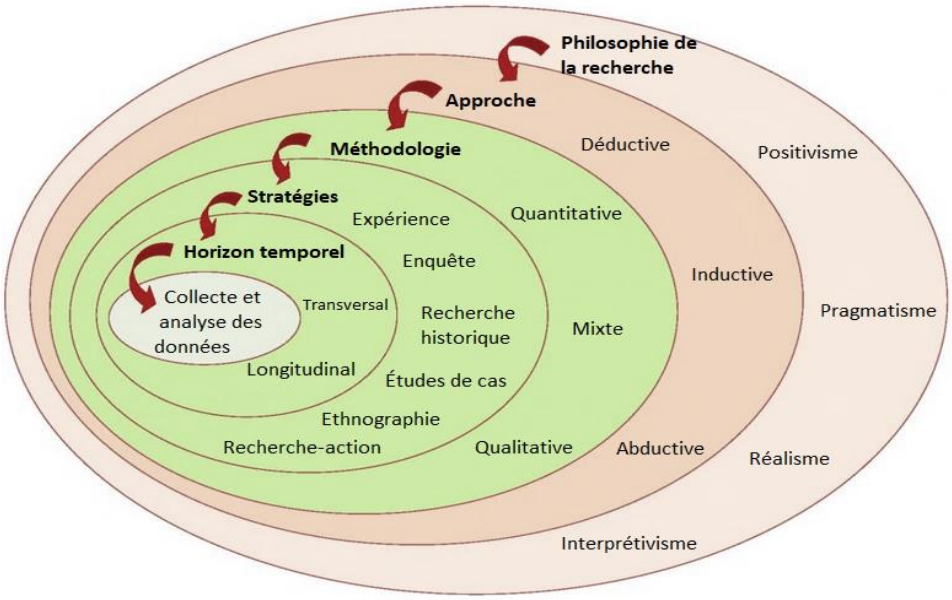


Figure 1 : Modèle conceptuel de la recherche « Oignon-Saunders » [19]

On trouve quatre écoles principales et prédominantes : le positivisme, l'interprétivisme, le pragmatisme et le réalisme [19]. Le positivisme en tant que théorie philosophique affirme que certaines connaissances sont basées sur des phénomènes naturels. En revanche, l'interprétivisme, connu sous le nom de constructivisme, dans une approche des sciences sociales, explique la connaissance de la réalité en tant que structure sociale formée par une personne ou un observateur spécifique. La réalité déduite de l'observation de cette personne est donc susceptible d'être différente d'une autre en raison de ces points de vue sociaux différents, ce qui signifie que les chercheurs interprétatifs doivent rechercher à explorer la vérité du point de vue des participants. Comme la durabilité des bâtiments est un domaine multidisciplinaire, il nécessite d'adopter une approche de réflexion collective face à différentes questions par l'examen de différentes opinions et perspectives, créant ainsi de nouvelles connaissances. Par conséquent, la philosophie de l'interprétivisme est adoptée dans notre recherche. Les méthodologies de recherche du modèle Oignon-Saunders se présentent en trois types : la méthode quantitative est toujours utilisée pour traiter les données numériques ; la qualitative concerne les données textuelles, tandis que la méthode mixte concerne à la fois les données numériques et textuelles. Nous résumons les avantages et les limites de chaque méthode (Tableau 1). Pour tirer l'avantage de chaque méthode, on peut utiliser des méthodes mixtes, cela implique l'utilisation de plus d'une méthode qualitative ou quantitative pour explorer et examiner un sujet ou un phénomène particulier. Il est utilisé pour fournir des preuves et valider les résultats afin d'ajouter de la précision à la recherche.

Tableau 1: Avantages et limites des méthodes de recherche [19]

	Méthode quantitative	Méthode qualitative
Avantage	- Recueillir des informations auprès d'un grand nombre de participants ; - Mesurer les données par analyse statistique ; - Étudier les relations entre les variables en détail de manière objective.	- Permet d'identifier des phénomènes nouveaux et non reconnus ; - Obtient des données riches et plus détaillées ; - Permet une étude approfondie de petits groupes.
Limite	- Résultats limités dans une recherche quantitative ; - Difficultés à obtenir des types de données fiables.	- Défis dans l'application des méthodes statistiques ; - Prend du temps.

La problématique de la recherche en relation avec les paradigmes de développement des bâtiments verts et des systèmes d'évaluation de la durabilité sont des sujets complexes et dynamiques, menés pour promouvoir la prise de décisions sur les actions à suivre pour rendre le secteur du bâtiment plus durable de côté environnemental, social et économique. En raison de cette complexité, cette thèse adopte une approche mixte combinant différentes stratégies de recherche, notamment : analyse scientométrique, revue de la littérature, enquêtes, entretiens non structurés, et études de cas.

En dernière étape du modèle d'Oignon-Saunders a classé l'horizon temporel, en transversal et longitudinal. Étant donné que l'horizon longitudinal se concentre sur un phénomène particulier et observe les changements dans le temps (période longue), cette étude est considérée comme transversale en se focalisant sur un phénomène particulier à un moment précis (sur une période courte). La figure 2 illustre un aperçu du cadre de recherche, lequel se structure autour des six étapes clés suivantes :

Phase 0 : Nous avons commencé la thèse par une revue de la littérature initiale ainsi que des entretiens informels avec des professionnels du secteur des bâtiments. Afin d'élaborer les questions de départ et les objectifs de recherche.

Phase 1 : Une analyse scientométrique de la production scientifique a permis de mettre en évidence la situation de la recherche sur les bâtiments durables dans la région MENA et l'état de l'art, afin de formuler la problématique **((Partie 1) Chapitre 1)).**

Phase 2 : Par la suite, nous avons examiné l'état des lieux de de déploiement d'une politique durable dans le secteur du bâtiment au Maroc et les certifications des bâtiments verts, à savoir HQE, BREEAM et LEED. En élaborant un questionnaire (Questionnaire A), nous avons classé les obstacles qui freinent leur déploiement ainsi que les moteurs susceptibles de les surmonter **((Partie 1) Chapitre 2) et 3)).**

Phase 3 : Cette phase a consisté à élaborer un référentiel d'évaluation des bâtiments résidentiels (BuSAF) adapté au contexte marocain. Nous avons étudié en détail les référentiels existants, en réalisant notamment une analyse comparative entre les référentiels internationaux, ainsi que des référentiels des pays similaires au Maroc dans la région MENA tels que : Egypte et l'Arabie saoudite.

Cette démarche a servi de base théorique pour le développement du nouveau référentiel d'évaluation de durabilité axé sur les trois piliers de durabilité, avec un accent particulier sur les bâtiments résidentiels **((Partie 2) Chapitre 1)).**

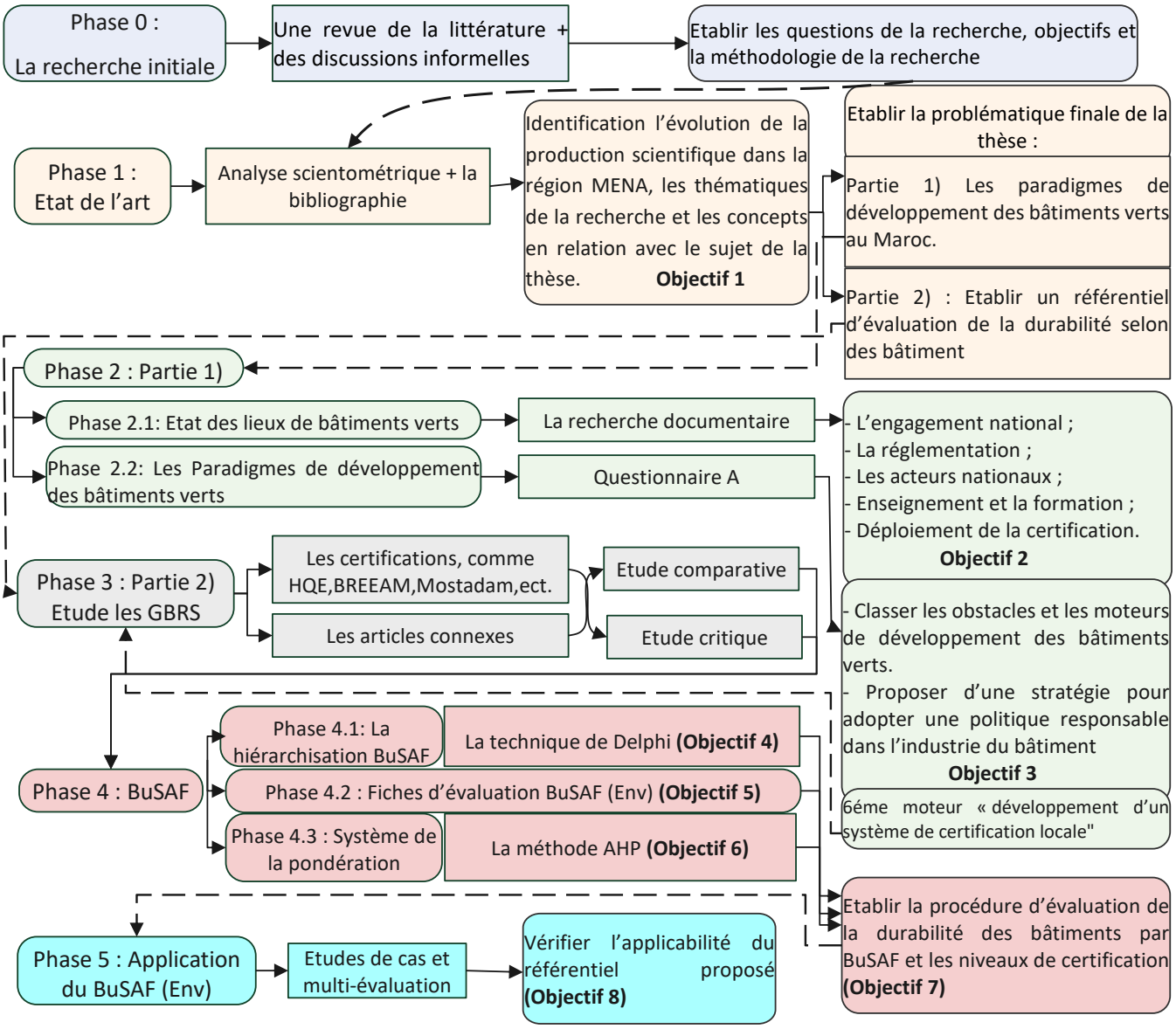


Figure 2: Processus de la recherche (Source : Auteur,2023)

La quatrième phase se subdivise en trois sous-phases suivantes :

- Phase 4.1 : Nous avons mis en œuvre la méthode de consultation Delphi pour atteindre un consensus entre des experts issus de divers domaines tels que l'université, le gouvernement et le secteur privé. Cette phase visait à déterminer les catégories les plus prioritaires dans le contexte marocain. L'analyse des données provenant des questionnaires de Delphi (questionnaire B.1 et B.2) a été réalisée à l'aide de statistiques descriptives, de tests non paramétriques et d'une analyse de consensus **((Partie 2) Chapitre 2)).**

- Phase 4.2 : Parallèlement, nous avons hiérarchisé les sept catégories environnementales en 29 sous-catégories et développé des fiches descriptives pour les critères d'évaluation, spécifiant la méthode d'évaluation, les niveaux de performance et les seuils de notation. Nous nous sommes appuyés sur la normalisation nationale et internationale telle que la bibliothèque de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer (ASHRAE), ainsi que des référentiels des pays similaires au Maroc, comme Green Pyramid Rating System de l'Égypte, Mostadam de l'Arabie saoudite et les systèmes internationaux. Dans certains critères, nous avons basé sur des résultats d'articles scientifiques **((Partie 2) Chapitre 2)).**
- Phase 4.3 : Elle a consisté à l'examen de diverses méthodes de décision multicritères (MCDM), la méthode Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) a été sélectionnée pour établir un système de pondération. Nous avons proposé une démarche d'évaluation selon les phases de vie du bâtiment **((Partie 2) Chapitre 3)).**

Phase 5 : Enfin, le référentiel proposé a été mis à l'épreuve à travers de deux études de cas portant sur des maisons marocaines modernes et une évaluation multiple a été effectuée en utilisant trois référentiels internationaux. Cette démarche avait pour but de renforcer et améliorer le référentiel BuSAF(Env) **((Partie 2) Chapitre 4))**.

Le manuscrit adopte une structure « Thèse par article », qui se compose par sept chapitres distincts. Chaque chapitre commence par une introduction, se poursuit avec une méthodologie et s'achève par une discussion des résultats obtenus.

1.6. Considérations éthiques

Le respect des principes éthiques (l'autonomie et la bienfaisance) a été pris en considération pendant les quatre questionnaires. Les participants ont été invités à y prendre part de manière volontaire par une lettre d'invitation envoyée par courrier électronique. Cela comprenait une brève présentation de la thématique de la recherche, de ses objectifs, ainsi que l'engagement à garantir la confidentialité des données fournies. Les participants ont été informés que leur identité resterait anonyme, conformément à la loi N° 09-08 du 18 février 2009 relative à la protection des données personnelles. Ils ont été assurés que toutes les données et informations recueillies à partir des questionnaires et des entretiens informels seraient utilisées exclusivement à des fins de recherche scientifique.

PARTIE 1 : ÉTAT DES LIEUX ET DES PARADIGMES DE DÉVELOPPEMENT DES BÂTIMENTS VERTS AU MAROC

Aperçu de la partie 1

La section « Introduction générale » a introduit la thématique de la thèse, en établissant le contexte du sujet et en identifiant les lacunes dans la connaissance actuelle. Dans cette partie, nous avons approfondi notre compréhension du sujet en analysant l'état de l'art. Parallèlement, nous avons analysé la production scientifique de la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord sur la base de 159 articles, en utilisant la méthode scientométrique sur le thème « Bâtiment vert ». Elle a permis de cartographier les thèmes principaux et les tendances de la recherche pendant la période 2000-2021. Dans un second temps, nous avons établi un état des lieux des bâtiments verts au Maroc, en abordant différents angles, à savoir : les stratégies gouvernementales, la réglementation nationale, l'offre d'enseignement et le déploiement de la certification internationale « Bâtiment vert » dans le marché national. Au dernier chapitre, nous analysons le retour des 167 répondants sur les obstacles entravant le développement des bâtiments verts au Maroc et les moteurs qui peuvent les surmonter.

CHAPITRE 1 : Analyse scientométrique et revue de la littérature sur la durabilité des bâtiments

1.1. Introduction

L'analyse scientométrique est une méthode quantitative utilisée pour mesurer la production scientifique, la visibilité et l'impact des travaux de recherche dans un domaine spécifique. Elle repose sur l'analyse de données bibliométriques, c'est-à-dire l'exploitation des informations contenues dans les publications scientifiques, telles que les articles de revue, les conférences, etc. Elle se base sur deux parties principales : l'analyse de la tendance de publication et la cartographie scientifique qui démontre l'évolution et les principaux thèmes de recherche, les domaines interconnectés, liens de collaboration, etc. Il convient de noter que les revues scientométriques peuvent compléter la revue systématique en détectant des liens entre différentes études, mais ne la remplaceront pas [20], c'est pourquoi nous complétons les résultats de l'analyse scientométrique par une revue de la littérature. Certains chercheurs ont déjà réalisé des analyses scientométriques sur le thème « Bâtiment vert » (Green Building : GB). Parmi, elles se trouve l'étude scientométrique de Zhao *et al*. (2019)[10] avec une analyse de 2980 articles publiés dans la base de données Web of Science (WOS) par le logiciel Citespace entre 2000 et 2016. Cette étude a été élargie en 2019 par Darko *et al*.[21] avec d'autres bases de données scientifiques telles que Scopus et Google Scholar. De même, Wuni *et al*. (2019)[22] ont focalisé sur les articles publiés dans les journaux spécialisés du bâtiment tels que «Building and Environment», « Energy and Buildings » et « Building Research and Information » pendant la période 2000-2018. Ces études ont traité la production scientifique dans le monde entier, alors que la revue d'Oguntona *et al*. (2021)[11] s'est intéressé à la production scientifique dans le domaine GB uniquement en Afrique. Elle a démontré que le nombre de publications sur la thématique « Bâtiment

vert » est très faible (156 articles) et seuls 10 pays en Afrique contribuent aux publications de recherche GB. En outre, les auteurs ont remarqué le faible niveau de collaboration entre les chercheurs et les institutions africaines. Les analyses scientométriques de Zhao *et al*. en 2016 [10], Wuni *et al*. (2019)[22], Shi *et al*. en 2019 [23] et Oguntona *et al*. en 2021 n'ont pas cartographié les réseaux de chercheurs de ce thème par les pays et par les institutions. Donc nous avons décidé de combler et de compléter la littérature existante, dans un contexte régional spécifiquement de la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord comme zone d'étude, vu les conditions climatiques et socio-culturelles proches et vu que le Maroc a été l'un des membres du Conseil régional (MENA) des bâtiments verts en 2016. Donc nous pensons que c'est une opportunité au Maroc pour une future collaboration avec les membres de la région MENA déjà bien avancée sur le sujet « Bâtiment vert ».

1.2. Méthodologie

La cartographie scientométrique est composée d'un ensemble de données scientométriques et des indicateur, comme : co-auteurs, co-citations et les clusters. Des logiciels tels que VOSviewer, SciMAT, CitNetExplorer, BibExcel, Sci2 Tool et CiteSpace sont couramment utilisés dans l'analyse des données pour les études scientométriques. Le logiciel VOSviewer (version 1.6.17) a été utilisé pour effectuer cette analyse. Ce logiciel permet la création, la visualisation et l'exploration de cartes basées sur les données bibliométriques. Les résultats sont affichés en clusters pour visualiser les connexions existantes entre les données bibliométriques. Le tableau 2 résume les principaux termes techniques utilisés par le logiciel. Chaque carte de réseau résultant des analyses contient des nœuds dont la taille est déterminée par la « Total Link Strength » ou le nombre de documents. Les lignes relient les nœuds avec l'épaisseur selon la force du lien.

Tableau 2 : Principaux termes du logiciel VOSviewer [24]

Items	**Objets d'intérêt (publications, chercheurs, auteurs et mots-clés).**
Link	Connexion ou relation entre deux Items.
Total Link Strength	La force cumulée des liens d'un élément avec d'autres éléments.
Co-authorship	Les réseaux de co-auteurs permettent de lier les institutions de recherche ou les pays en fonction du nombre de publications qu'ils ont produites en collaboration.
Co-occurrence	Le nombre de co-occurrences de deux mots-clés correspond au nombre de publications dans lesquelles ces deux mots-clés sont mentionnés ensemble dans le titre, le résumé et / ou la liste de mots-clés.

Dans l'étape de collecte des données bibliométriques nous avons utilisé les mots clés interchangeables suivants : « Sustainable/Green/Ecology » et « Building/construction » et le nom de chaque pays de la région MENA (par exemple, « Green building » AND « Morocco ») pendant la période janvier 2000-décembre 2021. Nous avons utilisé les articles et actes de conférence recensés à partir des bases de données : web of science, Scopus et les journaux spécialisés de l'éditeur MDPI.

Au total, 586 articles de recherche, 332 communications lors de conférences et 76 revues bibliographiques ont été trouvés. Les recherches qui n'ont pas été évaluées par des pairs ont été retirées pour garantir la qualité scientifique des articles analysés. En conséquence, 159 articles liés aux bâtiments verts ont été sélectionnés pour une analyse scientométrique, les articles représentaient 85% du nombre total de publications, suivis de loin par les vingt-quatre articles de conférences proceeding.

Il est admis que l'anglais est la langue dominante utilisée dans la communication des résultats de la recherche des GB, même dans de nombreux pays non anglophones tels que l'Iran, l'Algérie et le Maroc.

La figure 3 montre cadre général de notre étude bibliométrique. L'approche employée permet d'identifier les pays et les auteurs qui se concentrent le plus sur la recherche GB dans la région MENA, d'identifier les travaux publiés les plus cités sur la construction durable, de cartographier l'orientation de la recherche sur GB et d'identifier les tendances de la recherche sur GB.

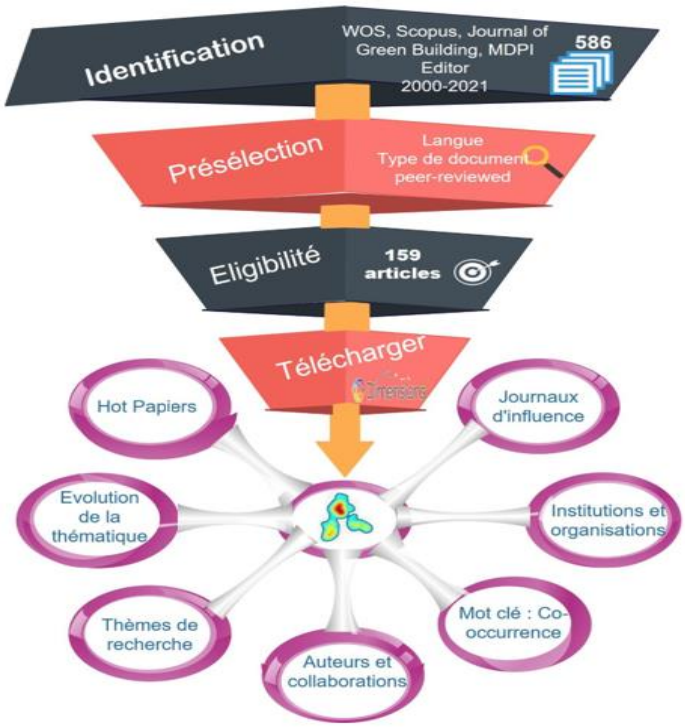


Figure 3: Cadre méthodologique de l'étude scientométrique (Source : Auteur,2023)

1.3. Résultats et discussions

1.3.1. Concept du bâtiment durable

Le concept de développement durable (DD) remonte à la publication du rapport « The Limits to Growth » par le Club de Rome en 1972. Quelques années plus tard, pendant la déclaration de Cocoyoc (Mexique) en 1974, le Symposium du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) a discuté la signification du développement durable, avec l'importance de considérer le droit des générations futures. Cependant, la définition plus citée de la durabilité a été donnée en 1987 par la Commission Brundtland. Elle a défini le développement durable comme un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Cette définition classique a été légèrement modifiée par Leach *et al*. (2010)[25] pour que le développement durable est la capacité de maintenir pendant des périodes de temps indéfinies des qualités spécifiées de bien-être humain, d'équité sociale et d'intégrité environnementale. Lew *et al.* (2016)[26] l'ont décrit comme « la protection et le maintien des ressources naturelles et culturelles pour l'avenir et l'atténuation des changements climatiques ». En fait, le concept de DD change et

évolue constamment avec le développement de la connaissance, du savoir-faire et de la politique internationale en termes de la durabilité. Ces définitions restent toujours très générales. De sorte qu'on peut en dire en paraphrasant Saint Augustin « le développement durable, je sais ce que c'est tant qu'on ne me demande pas de le définir. Quand on me le demande, je ne sais plus » [27]. Au-delà, l'expert de la responsabilité sociale des entreprises John Elkington (1998) a développé le principe du « Triple Bottom Line » (TBL) qui fait référence aux trois aspects du DD : le social, l'environnement et l'économie [28]. On a plusieurs modèles d'interprétation tels que les deux modèles de la poupée russe (a : durabilité faible et c : durabilité forte) et le modèle du diagramme de Venn (Figure 4 (b)) et chacun d'entre eux offre ses propres forces et ses faiblesses.

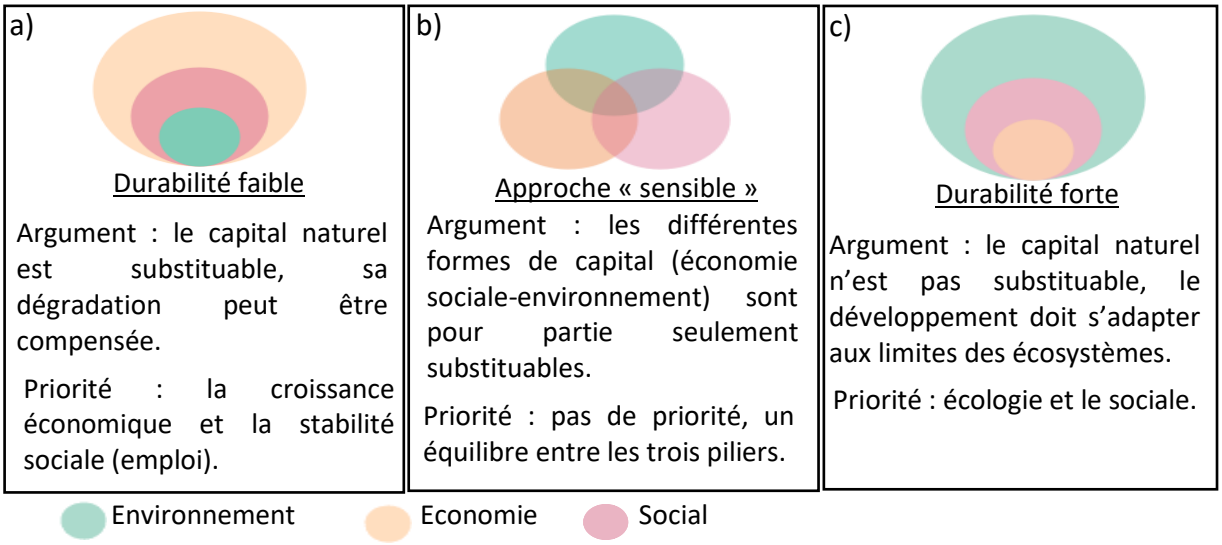


Figure 4: Modèles de la durabilité (modifié par l'auteur

Malgré la portée pratique, de la conceptualisation dans différentes dimensions de durabilité, elle a fragmenté le concept de « Développement durable »[30][31] . Cette division a été critiquée, car la durabilité souvent été considérée exclusivement par le pilier environnemental plus que via les deux piliers économique et social. La durabilité était considérée comme un concept en évolution continue. Il est prévu que de plus en plus des piliers de durabilité seront ajoutés selon le contexte et les priorités des pays. Certains auteurs recommandent l'inclusion d'un quatrième, cinquième ou plus : la culture, politique ou de la gouvernance et management. Comme l'étude de khan *et al*. (2021)[32] ont suggéré d'ajouter deux dimensions : la culture et la gouvernance dans le modèle TBL (environnement, social et économie) au Kazakhstan.

Pour mettre en pratique le concept de la durabilité. L'Assemblée générale des Nations Unies (ONU) a lancé le programme de développement durable à l'horizon 2030 en septembre 2015 en tant que plan partagé pour aborder le TBL de la durabilité. Il se compose de 17 objectifs de développement durable (ODD), comme le montre la figure 5. Les auteurs de Garretson *et al*.(2016)[33] ont reconnu que

l'approche de la durabilité diffère en fonction du domaine d'application, comme l'ingénierie, le management, l'écologie, le droit ,etc.

Dans les années 1960, Paolo Soleri, un architecte italo-américain connu par le développement de concept d'« Ecoconstruction » ou « Construction écologique », a combiné l'écologie et l'architecture en « Arcologie » [34]. En 1969, Ian Lennox McHarg, un architecte américain, a publié un livre intitulé « Design with Nature », qui marque officiellement le concept « Bâtiment écologique » [35]. Des terminologies interchangeables ont été utilisées dans la littérature, telles que : bâtiment « Durable », « Vert » ou « Ecologique » et qui doivent être clarifiés.



Figure 5: Objectifs de développement durable

L'une des premières définitions a été formulée en 1993 par le conseil U.S. Green Building qui identifie les aspects fondamentaux d'un bâtiment durable qui pourraient être résumés dans les catégories du référentiel LEED : site durable, efficacité de l'eau, énergie et atmosphère, matériaux et ressources et la qualité de l'environnement intérieur [36]. Un an plus tard lors de la première conférence internationale sur la construction durable qui s'est tenue en Floride, le Conseil international du bâtiment (CIB) a défini le bâtiment durable comme « ...la construction et l'exploitation d'un environnement bâti sain basé sur l'efficacité des ressources naturelles et une conception écologique ». Comme illustre la figure 6 , le bâtiment durable selon CIB s'articule sur sept principes : les 3R (la réduction, la réutilisation et le recyclable), la protection de la nature, l'élimination des produits polluants, appliquer le coût du cycle de vie et de la qualité des cinq ressources naturelles [37]. Ces principes s'appliquent à l'ensemble du cycle de vie du projet, de la planification à la démolition.

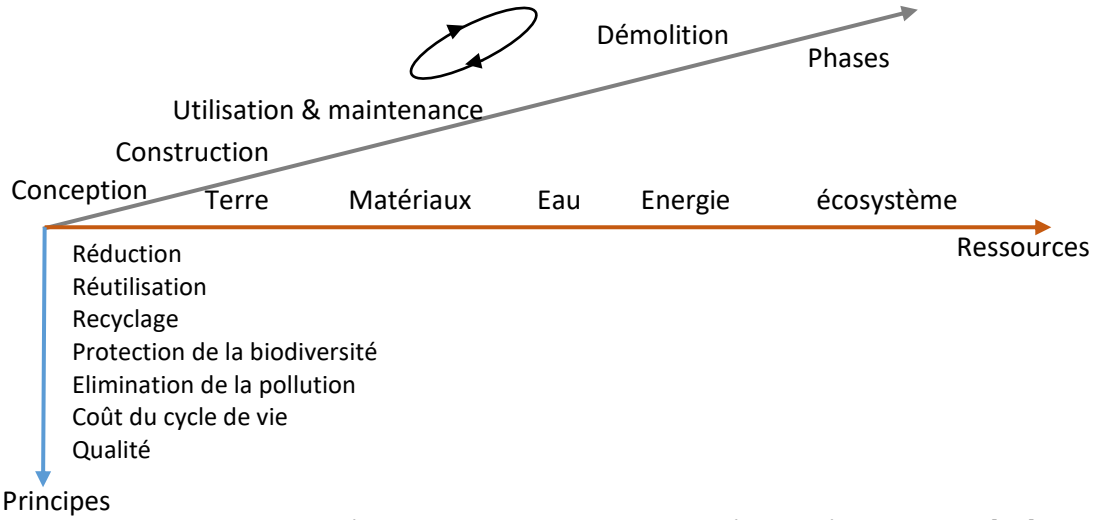


Figure 6: Modèle de la construction durable développé par CIBTask [37]

On remarque que ce modèle de durabilité des bâtiments priorise les performances environnementales par rapport aux enjeux sociaux et économiques. La norme ISO 15392:2019 (Durabilité dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil) a déclaré que les ouvrages de la construction durable devraient considérer les trois aspects principaux : économique, environnemental et social, tout en répondant aux exigences techniques et de performance fonctionnelle [38].

Yoshida *et al.* (2010) [39] ont défini le bâtiment vert comme « c'est un bâtiment qui répond à certains critères de performance environnementale tout au long du cycle de vie ». Le Green Building Council (World GBC) a défini ainsi que le bâtiment vert comme « un bâtiment qui, dans sa conception, sa construction ou son exploitation, réduit ou élimine les impacts négatifs et peut créer des impacts positifs, sur notre climat et notre environnement naturel » [40]. Alors que le terme du bâtiment écologique peut ainsi paraître assez flou. Toutefois, on peut le définir comme étant une habitation consommant moins de ressources naturelles et réduisant son impact environnemental en termes de pollution.

Actuellement, les chercheurs emploient souvent ces trois termes de manière interchangeable. Cependant, dans cette thèse, en utilisant le terme « Bâtiment vert » dans la première partie, puis en seconde partie le concept de « Bâtiment durable », lorsque nous développons un référentiel d'évaluation de la durabilité.

1.3.2. Dimension de la durabilité des bâtiments

Il est bien démontré que les dimensions économique, sociale et environnementale sont considérées comme les principaux piliers de la durabilité. Le traditionnel modèle de performance d'un projet du bâtiment se concentre sur les objectifs de coût, la qualité technique et le temps. Vanegas *et al.* (1996) [41] a ajouté à ces critères la minimisation de l'épuisement des ressources et de la dégradation de l'environnement et la satisfaction humaine. La figure 7 présente le principal changement de paradigme vers un bâtiment durable.

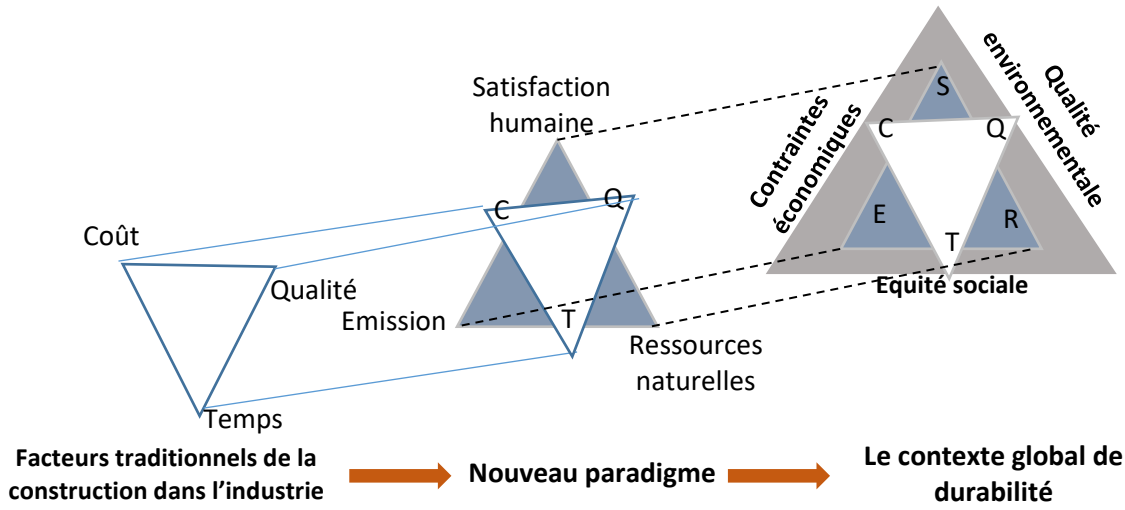


Figure 7: Nouveau paradigme : du bâtiment conventionnel à durable [41]

Ce modèle du paradigme de durabilité montre les axes qui doivent être pris en compte lors d'un projet du bâtiment qui cherche à maximiser la qualité de l'environnement bâti, à éliminer l'impact négatif sur l'environnement naturel et la satisfaction humaine (bien être), tout en respectant les trois paradigmes traditionnels (coût, qualité et temps). Le modèle n'intègre pas l'approche de raisonnement sur l'ensemble du cycle vie « Life cycle Thinking » du bâtiment. Donc ce modèle doit être pris en compte lors de la conception à toutes les étapes du cycle de vie du bâtiment. Les concepteurs et constructeurs aborderont la phase de conception et de construction en gardant à l'esprit les autres aspects (environnement et le bien-être) et pas seulement les coûts initiaux et le calendrier du projet. Les considérations relatives au cycle de vie sont particulièrement importantes en ce qui concerne l'exploitation, l'entretien et la démolition. De plus, les choix de caractéristiques de conception plus coûteuses effectués lors de la construction du bâtiment peuvent être compensés par les économies de coûts, de ressources et d'énergie réalisées tout au long du cycle de vie du bâtiment.

Alors de nombreux chercheurs ([42], [43], [28]) ont contribué à intégrer le principe de TBL dans le modèle traditionnel (coûts, temps et qualité) d'efficacité d'un projet de construction. Nous présentons les aspects liés aux trois piliers de durabilité :

Les aspects environnementaux

La performance environnementale du bâtiment dépend de la conception du bâtiment, la sélection des matériaux de construction, la qualité des travaux de construction, l'emplacement du bâtiment et le choix de la source d'approvisionnement en énergie pendant la phase d'occupation. Réduire les impacts environnementaux totaux du cycle de vie d'un bâtiment n'est donc pas une tâche facile, en partie à cause de la complexité de mesurer une performance optimale des aspects susmentionnés, mais aussi en raison du risque de transfert des impacts négatifs d'une étape à l'autre. A titre d'exemple, pour réduire la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement, on peut choisir d'isoler plus et

de mettre un triple vitrage au lieu de fenêtres à simple vitrage, mais encore une fois, ces solutions augmenteront les impacts environnementaux incorporés.

Les aspects environnementaux, tels que la pollution et les déchets font partie des catégories récemment introduites pour les nouveaux référentiels d'évaluation de la durabilité environnementale, ainsi que des catégories d'eau, d'énergie et des matériaux.

Les aspects économiques

Selon la définition du Building Research Establishment (Institut britannique privé à Londres), la durabilité économique augmente les bénéfices économiques grâce à une utilisation plus efficace des ressources, telles que l'énergie, l'eau, les matériaux, etc. Aujourd'hui, la performance économique d'un bâtiment ne se limite pas seulement aux bénéfices, les chercheurs se sont efforcés d'introduire de nouveaux aspects économiques, tels que d'assurer des bâtiments verts à coût raisonnable « Affordability », l'analyse des coûts du cycle de vie et l'impact sur l'économie locale.

Les aspects sociaux

La durabilité sociale doit répondre aux besoins des groupes sociaux impliqués dans le processus de construction, pour garantir la satisfaction globale du client et des employés concernés par le chantier de construction. En tant que suite à cette définition, la durabilité sociale couvre les différentes questions allant des besoins physiologiques des habitants aux besoins psychologiques [46]. La durabilité sociale est basée sur les besoins humains, tels que la santé, le confort, la satisfaction, la sécurité, la culture et le patrimoine et l'interaction sociale.

1.3.3. Performance des bâtiments dans une perspective de cycle de vie

Un projet de construction aura divers impacts économiques, sociaux et environnementaux à différents stades du cycle de vie. Sharma et *al.* (2011)[47] affirment qu'une meilleure compréhension des phases de construction et de leurs activités connexes est nécessaire pour intégrer la durabilité dans les différentes étapes du cycle de vie du bâtiment. Selon la norme EN 15978 :2011 - Sustainability of construction works, le cycle du vue d'un projet de construction, notamment le bâtiment se présente en quatre phases principales (ligne pointillée) : conception et approvisionnement, processus de construction, utilisation et fin de vie (Figure 8). Ces quatre phases ont des impacts évidents sur la durabilité du bâtiment.

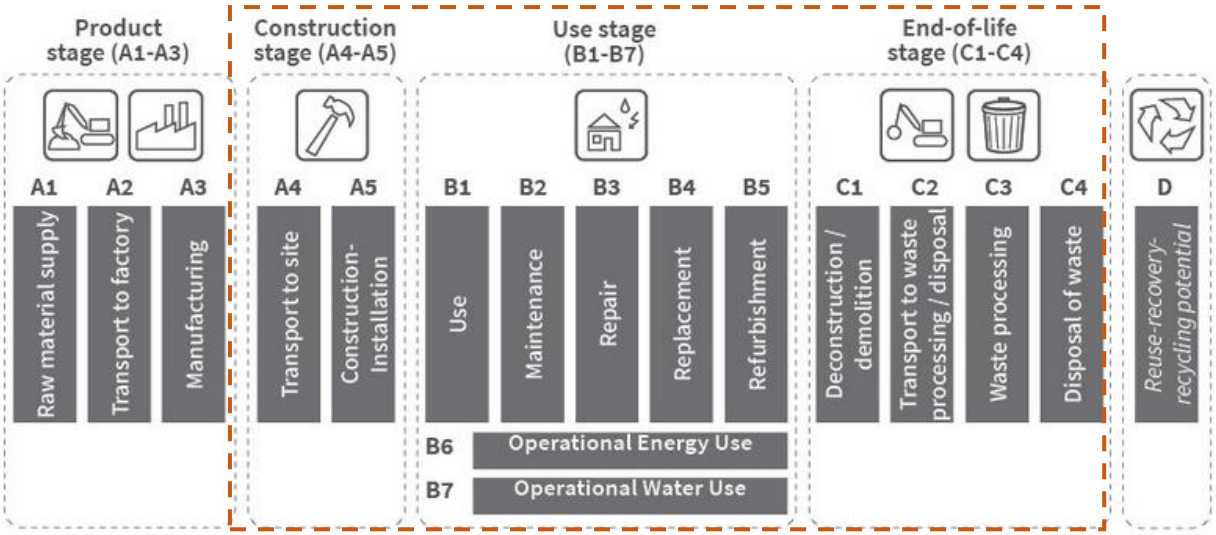


Figure 8: Phases de cycle de vie du bâtiment selon la norme EN 15978 :2011-sustainability of construction Works

1.3.3.1 Phase de conception (A0)

Lors de la phase de conception, comme au début d'un projet, il joue un rôle important dans l'amélioration des performances du bâtiment pendant les prochaines phases. C'est à ce stade que les performances en matière de durabilité environnementale peuvent être décidées grâce à la sélection du site du bâtiment , des matériaux, des technologies, des systèmes de chauffage, de refroidissement et de ventilation mécanique et d'autres [48]. De plus, des décisions importantes sont prises pendant cette phase concernant le type d'occupation, sa forme, ses dimensions et le type de système structurel [49]. Cependant, cette étape offre l'opportunité de rassembler dès le départ toutes les parties prenantes (les développeurs, les consultants, les gestionnaires, les architectes, etc.) de mettre en œuvre des stratégies durables pour le projet [49]. Tous ces éléments ont un impact significatif sur la constructibilité, le coût et la performance globale d'un bâtiment. Certaines études ont démontré l'importance d'étape de conception sur la performance globale du bâtiment, comme Lamrahi *et al.* (2018)[50] ont révélé que le fait de construire des bâtiments orientés correctement peut réduire la consommation d'énergie de chauffage entre 29 à 35 % sans coût supplémentaire. Une autre étude, Dwaikat et *al.* (2018)[51], une légère augmentation des coûts initiaux d'environ 2 % pour une conception durable se traduisent en moyenne par des économies sur le cycle de vie d'environ 20 % des coûts totaux de construction. L'impact économique majeur à cette étape comprend l'analyse de l'offre et de la demande, les prévisions de marché, le plan d'investissement, l'évaluation et l'analyse du marketing et le financement des coûts et des bénéfices auront des impacts cruciaux sur la performance globale en matière de durabilité économique. Tandis que, les impacts sociaux à ce stade peuvent inclure l'influence du projet sur le développement social local, protection de la culture, du patrimoine local et d'opportunités d'emploi [46].

1.3.3.2 Phase de construction (A4-A5)

La phase de construction d'un bâtiment fait référence à approvisionner en ressources sur le site et à une série d'activités de construction (gros œuvre, finitions, etc.) jusqu'à ce que les bâtiments soient achevés [52]. Les carburants utilisés par les équipements lourds sur les chantiers de construction et dans les transports, ainsi que l'électricité utilisée et l'éclairage sont tous inclus dans cette étape [52]. Selon les études d'analyse de cycle de vie des bâtiments ([53],[54],[55]), la phase de construction représente au total 8 à 20 % de la consommation d'énergie au cours du cycle de vie d'un bâtiment. Bien que la contribution des impacts environnementaux dans la phase de construction soit faible par rapport aux valeurs de l'ensemble du cycle de vie, cette phase ne peut être négligée en raison des impacts négatifs immédiats sur l'environnement dus à la consommation excessive de matériaux de construction, à la consommation d'eau, à une mauvaise gestion des déchets et des nuisances locales (bruit, vibrations, odeurs, poussières, etc.). Di Maria *et al.* (2018)[56] ont déclaré que l'impact de la phase de construction peut être plus intense en raison de la période de construction plus courte par rapport à la phase d'exploitation.

En revanche, d'un point de vue économique, les coûts de construction à ce stade comprennent le coût de la main-d'œuvre, des installations et des matériaux. C'est ce que les propriétés et les gestionnaires et autres considèrent en premier, outre les avantages environnementaux et sociaux réels [51]. Comme les auteurs Dwaikat et *al.*(2018)[51] ont cité précédemment que les coûts d'investissement supplémentaires pour les bâtiments écologiques varient de 10 à 25 % de plus que pour les bâtiments conventionnels. Les matériaux durables et l'utilisation de technologies de construction verte contribuent aux coûts plus élevés pendant la phase de construction. Selon Xue et *al.* (2019)[57], les bâtiments construits avec des matériaux verts coûtent environ 3 à 4 % de plus que les projets conventionnels . Le temps nécessaire à la mise en œuvre des technologies de construction verte entraîne des coûts de construction plus élevés et davantage de visites du chantier sont nécessaires pour l'équipe de projet [57] .

D'un point de vue social, la phase de construction est une composante essentielle du marché du travail, car elle génère des opportunités d'emploi [58]. Cependant, elle a été critiquée comme étant une profession à haut risque, où de mauvaises conditions de travail, la santé et la sécurité sont associées à la construction du bâtiment [59]. Selon l'article d'Ibtissam BENCHANNA publié le 22 décembre 2022 ,« Sécurité des ouvriers » dans le journal de la vieÉco [60], le secteur du bâtiment et travaux publics (BTP) au Maroc est l'un des secteurs enregistrant le nombre le plus élevé d'accidents de travail. En moyenne, 40000 accidents de travail chaque année, avec 2000 décès sont déclarés. Les principales causes de ces accidents sont les chutes de hauteur, les erreurs d'exploitation liées aux transports et aux équipements du chantier. Dans ce cas, l'emploi et la sécurité sont considérés comme les deux impacts sociaux

majeurs pendant la phase de construction. Selon Yousri et *al.* (2022)[59], les activités de construction ont des impacts négatifs sur le quartier voisin et pourraient affecter la circulation locale.

1.3.3.3 Phase d'utilisation (B1-B7)

Lors de la phase d'exploitation, la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre sont importantes. Plusieurs études ont montré que par rapport aux autres étapes, la phase d'exploitation représente 80 % de la consommation totale d'énergie, tandis que la phase de production des matériaux et de construction est de 15 % et 5 % pour les autres phases du cycle de vie de 50 ans du bâtiment ([53],[54],[55]). En plus de la consommation d'énergie, la phase d'exploitation est consomme de ressources naturelles, notamment en eau douce avec environ 60 à 70 % du total du cycle de vie, tandis que la phase d'approvisionnement des matériaux de construction représentait un total de 30 à 40 % d'eau virtuelle ([61]–[63]).

En termes économiques, les coûts de la phase d'exploitation représentent environ 55 % du coût total sur une durée de vie de 40 ans [51]. L'importance des coûts d'exploitation, tels que ceux liés à des factures des services publics, à l'entretien des installations ou le remplacement. Afin d'évaluer les coûts d'exploitation des bâtiments, certaines données et hypothèses nécessaires, notamment les coûts d'investissement initiaux, les coûts d'entretien et de réparation et les coûts de gestion.

Concernant l'aspect social, la santé et le confort des occupants, ainsi que la satisfaction et la productivité des occupants sont les préoccupations majeures en phase d'exploitation [58]. La santé et le confort des occupants sont étroitement liés au syndrome des bâtiments malsains comme : irritation des yeux, du nez et de la gorge ; fatigue mentale fréquence élevée d'infection des voies respiratoires, etc. Alors que le confort des occupants de la température de l'air intérieur, l'éclairage, la température radiante, le son, l'humidité relative, la qualité de l'air sont importants, qui peuvent améliorer la qualité et la productivité des utilisateurs et des occupants [64].

1.3.3.4 Phase de démolition (C1-C4)

Lorsqu'un projet du bâtiment approche de la fin de sa durée de vie utile, la démolition aura lieu. Les déchets produits par la démolition ainsi que l'élimination des déchets vers les décharges ont un impact négatif sur l'environnement [65]. D'une manière générale, le recyclage et l'élimination des déchets de démolition ont un impact sur la conservation des ressources. Grâce au recyclage et à la réutilisation des déchets de démolition, cela réduit l'extraction de matières premières utilisées pour la production de nouveaux matériaux de construction, ce qui permet d'économiser de l'énergie [66].

D'un point de vue économique, les principaux impacts comprennent le coût de démolition comprenant principalement les frais d'administration, le coût de la main-d'œuvre et les coûts de l'élimination des déchets, alors que ces coûts sont toujours différents en raison des différentes technologies de démolition utilisées. En outre, les matériaux démantelés du projet auront toujours une valeur économique et pourront être recyclés ou réutilisés pour de futurs projets de construction [67].

Socialement, la sûreté et la sécurité de la communauté sont autant une grande importance lors de la phase de démolition. Les opérations de démolition entraîneront des problèmes de sécurité tant pour le public que pour les travailleurs de démolition. La satisfaction de la communauté doit être dûment prise en compte lors de la phase de démolition [68].

Comme indiqué ci-dessus, le cycle de vie d'un bâtiment peut être divisé en plusieurs phases et chaque phase joue un rôle essentiel dans la durabilité du bâtiment. Par conséquent, lorsque la performance de durabilité d'un bâtiment est examinée, toutes les phases du cycle de vie d'un bâtiment doivent être prises en considération.

1.3.4. Tendance de publication annuelle

La publication de recherche « Bâtiment vert » dans le monde a avancé depuis 1998 [10]. Elle a commencé dans la région MENA en 2001 par un article. Un intérêt croissant lié au GB par le comité scientifique, comme en témoigne l'augmentation significative du nombre d'articles publiés et du nombre d'auteurs annuellement. Le nombre de publications par an est passé de 2 articles en 2006 à 25 en fin décembre 2021 (Figure 9). Entre 2006 et 2012, le taux de publication en relation avec GB a augmenté d'environ 200 %. Il a ensuite connu une légère baisse en 2015-2016, suivie d'une augmentation régulière chaque année. Après 2016, le rythme de publication montre une moyenne annuelle d'environ 10 articles malgré la période de confinement de COVID-19 qui a paralysé la plupart des activités académiques et de recherche. Ainsi le nombre moyen d'auteurs par publication de GB dans la région est de 2 en 2001, qui a augmenté régulièrement pour atteindre 3.84 en 2021. De même, le nombre moyen de références est passé de 13 en 2001 à 50.92 en 2021.

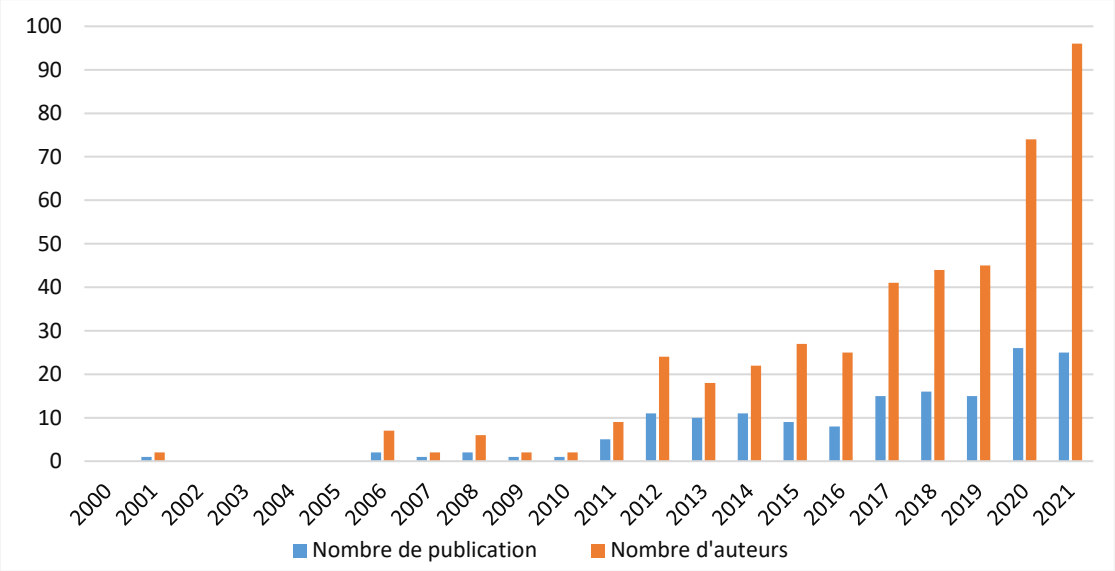


Figure 9: Evolution de la publication dans la région MENA en terme « Bâtiment vert » de 2000 à 2021 ((Source : Auteur,2022 [69])

La qualité des 2133 références citées dans les 159 articles est discutable. A l'aide d'analyse de co-citation (cited references) nous avons trouvé seulement 324 références citées au minimum 2 fois, c.-

à-d. mille-huit-cent-neuf références citées une seule fois dans les articles. Notre choix de travaux scientifiques qui incluent des articles publiés à partir des Proceedings de conférences peut affecter la qualité des références de publication. Cette tendance de croissance de production scientifique dans les GB était observée dans des études scientométriques dans le monde. L'augmentation progressive des publications et des références indique un niveau de communication de plus en plus élevé dans le domaine de la recherche en GB au cours des 20 dernières années dans la région MENA. Mais le résultat de la recherche sur les bâtiments verts dans la région est faible par rapport au nombre significativement élevé dans les pays développés.

1.3.5. Contribution des pays/territoires

La contribution des différents pays/territoires est analysée selon le lieu d'étude. Nous avons éliminé les études qui font l'objet de collaborations régionales entre les pays de la région MENA. Au total, 18/19 pays de la région MENA ont contribué à la recherche de GB. La figure 10 montre la répartition des articles publiés dans la région MENA. Comme indiqué dans l'annexe (A) et la figure 10, l'Arabie saoudite arrive en tête du classement avec un total de 27 publications suivi des Émirats arabes unis (16), de l'Iran (15), du Qatar (14) et du Royaume de Jordanie (13). Le résultat n'est pas surprenant, car ces pays ont tous des universités dans le top 300 du classement mondial des universités. Le classement Times Higher Education (THE) (Research) pour 2021 classe les universités d'Arabie saoudite entre 31-300, cependant les universités marocaines sont dans la tranche 200-400.

Cependant, après l'analyse des citations par « Countries », on trouve la Jordanie (315 citations), Israël (148), Émirats arabes unis (UAE) (114), Iran (93) et l'Arabie saoudite (67) qui sont des pays parmi les plus influents dans la recherche sur le bâtiment écologique dans la région MENA.

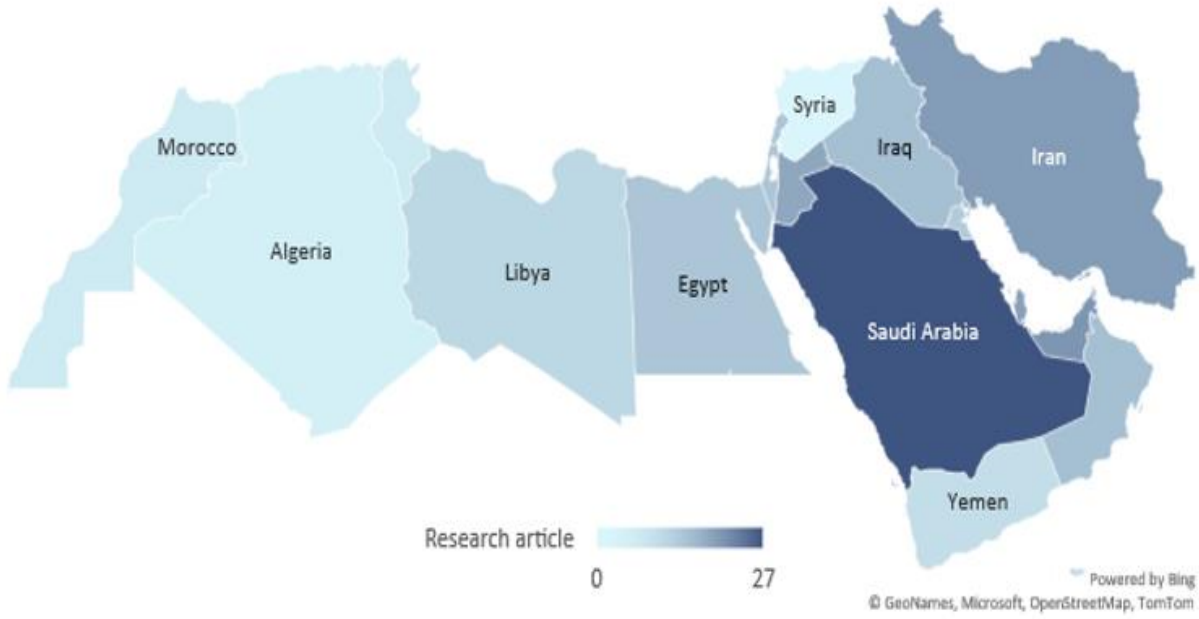


Figure 10: Contribution par pays de la région MENA (2000-2021)(Source : Auteur,2022 [69])

Nous analysons ensuite les publications de chaque pays de la région MENA selon la production scientifique locale ou selon une coopération internationale. L'Arabie saoudite est leader dans le nombre de publications, mais pour 13 publications ce sont des contributions des « Ambassadeurs saoudiens » qui s'installent dans des unités de recherche des pays développés telles que le Royaume-Uni et l'Australie. Cela se confirme par le taux faible de SP (single country publications) de 30 % (Annexe A). Cependant, des pays comme l'Égypte avec un taux de SP 87.50 % et Israël (SP=100 %) font leurs propres efforts pour développer la recherche scientifique dans leurs unités de recherche. D'autres pays comme Oman s'intéressent beaucoup à des collaborations scientifiques sud-nord (5 articles) et un seul article avec le premier auteur qui fait partie d'un laboratoire Omanie.

1.3.6. Tendances des publications de recherche en GB par source de documents

L'analyse de la tendance des publications de recherche sur le GB par source de documents peut être d'une utilité immédiate pour les jeunes chercheurs des pays de la région MENA afin de trouver les meilleures sources d'information, et pour les auteurs pour trouver les revues les mieux adaptées à la publication de leurs travaux. Dans cette étude, une analyse des citations directes a été menée pour fournir des preuves de l'importance des revues qui publient les travaux de la recherche en GB, nous employons l'analyse « Citation » de VOSviewer et l'unité d'analyse était « Document ». L'annexe (B) montre les dix principales revues publiant les travaux de recherche des auteurs de la région MENA classés selon la force totale des liens. Parmi ces revues, « Building and Environment » est classé au premier rang pour la force totale des liens, les liens et le nombre des citations. Ces revues sont classées parmi les 25 % top des journaux de Scopus 2021. Des Actes du Congrès sont publiés dans des collections à haute qualité comme « Energy Procedia » et « Procedia engineering » entre 2009 et 2019.

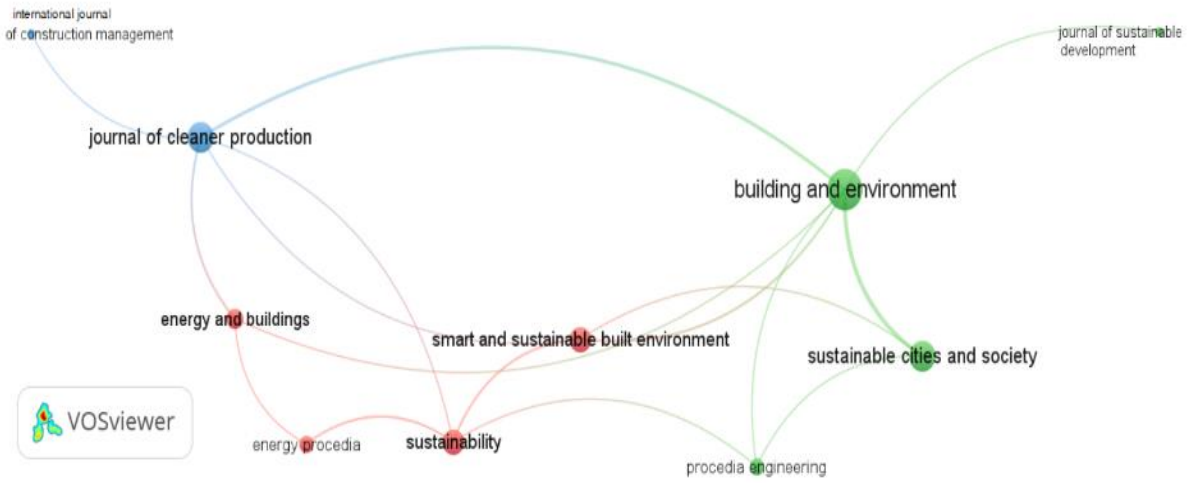


Figure 11 : Réseau (Total link strength) des revues scientifiques de publication dans la région MENA (Source : Auteur,2022 [69])

Nous ajoutons deux conditions de l'analyse « Citation », le « nombre minimum de documents d'une source » et le « Nombre minimum de citations d'une source » ont été fixés à au moins trois articles et au moins 20 citations. En outre, il n'y a pas de normes guidant la sélection du nombre de documents

et de citations. Sur les 77 sources identifiées, 10 ont atteint ces seuils et ont été incluses dans le réseau résultant, qui consistait en 16 liens (Figure 11).

La carte a été générée à l'aide de la fonction de réseau « Total link strength » de source de VOSviewer et l'outil déploie des cartes basées sur la distance et la taille du nœud (journal), ce qui reflète l'impact de la revue. Les trois journaux suivants : « Building and Environment », « Journal of Cleaner Production » et « Sustainable Cities and Society » ont des nœuds relativement plus grands que le reste des nœuds ; ce qui met en évidence leur impact plus important dans les publications de recherche des GB dans la région MENA en même dans les études internationales. Les lignes de connexion démontrent les liens de citation entre les journaux de recherche. Le journal « Building and Environment » montre un lien de citation plus fort avec le journal « Sustainable Cities and Society » que le journal « Energy and Building » (Figure 11). Ainsi dans les clusters, les revues proches ont des liens de citation plus forts que celles isolées au sein du cluster.

1.3.7. Analyse des citations de documents

Sur la base de l'analyse visualisée de 159 documents de la base de données avec VOSviewer, nous pouvons obtenir un réseau de citations des documents avec 13 nœuds et 37 liens. Dans le réseau, les nœuds représentent la situation des documents dans la base de données sélectionnée dans cette étude, et les liens représentent les relations de citation entre un nœud et un autre. Plus le nœud est grand, plus la fréquence de citation du document est élevée, ce qui indique que le document est d'une grande importance dans la discipline de recherche du GB dans la région MENA. Les documents avec la fréquence de citation de plus de 10 fois pendant la période d'étude sont sélectionnés pour une analyse de citation. La figure 12 et l'annexe (C) montre les principaux documents fréquemment cités de 2000 à 2021 dans les 159 sélectionnés et un aperçu des cinq premiers documents sont présentés.

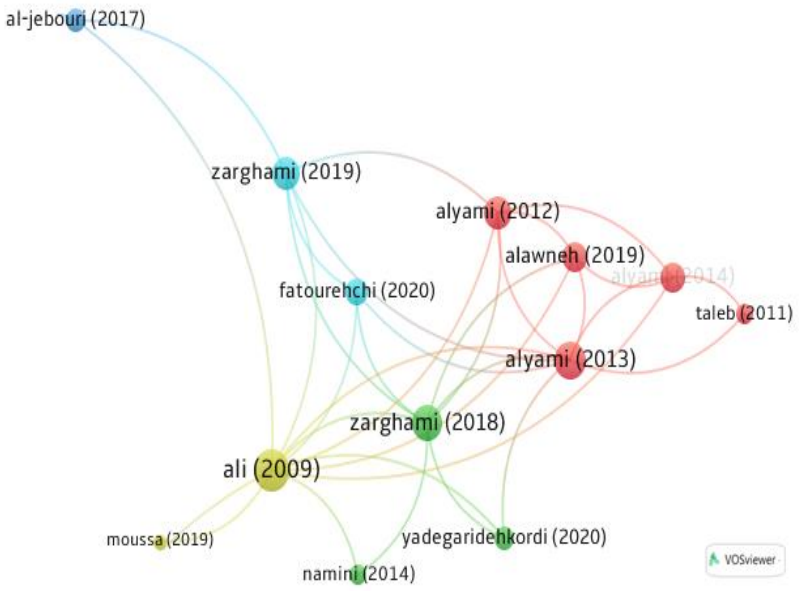


Figure 12: Réseau de citation des documents dans la recherche GB (Source : Auteur,2022 [69])

Ali *et al*. (2009)[16] ont développé un cadre d'évaluation des bâtiments verts pour les bâtiments résidentiels en Jordanie ; c'est l'un des premiers articles dans le domaine de développement des systèmes d'évaluation, ils ont introduit les « Aspects liés aux coûts et à l'économie» comme nouvelle catégorie dans l'évaluation de la durabilité. Trois ans plus tard l'équipe d'Alyami *et al*.(2013)[70], [71],[72] ont continué dans le même domaine en Arabie Saoudite. Aussi bien, l'équipe iranienne Zarghami *et al.* en 2018 [73], a mis en œuvre un cadre d'évaluation de durabilité des bâtiments résidentiels. En 2019, la même équipe a développé des critères d'évaluation de la durabilité des bâtiments résidentiels type multi-famille [74].

1.3.8. Principaux domaines de recherche

La cartographie des mots-clés nous permet de découvrir les principaux domaines de recherche dans le domaine des bâtiments verts. Pour ce faire, les meilleures pratiques proposées dans le manuel du logiciel VOSviewer par van Eck et Waltman [24] ont été définies sur « Co-occurrence » et la « Méthode de comptage » a été définie sur « Comptage complète ». Un total de 3191 mots-clés a été extrait à partir des titres et les résumés de l'ensemble des 159 articles. Le « nombre minimum d'occurrences » fixé à 10 est rempli avec l'obtention de 68 mots-clés dans notre cas. Après exclusion des termes génériques (tels que bâtiment, pays, découverte…), le réseau résultant décrivant les principaux clusters de la recherche scientifique actuelle dans la région MENA se composait de 41 nœuds et de 796 liens en 3 clusters, comme l'a montré la figure 13.

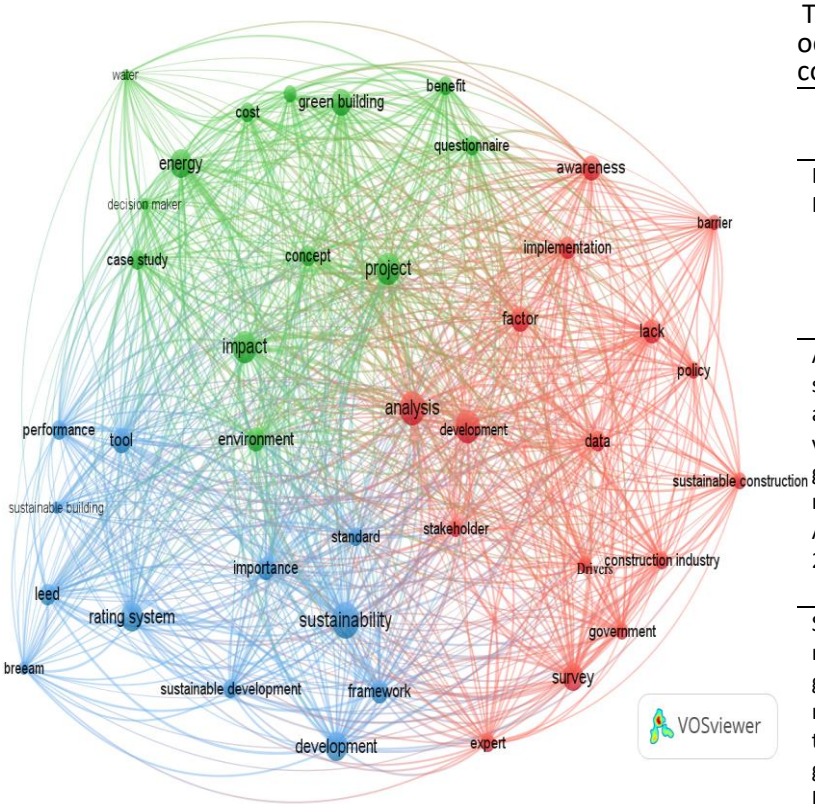


Figure 13: Carte de visualisation du réseau de co-occurrence des mots-clés (Source : Auteur,2022 [69])

Tableau 3: Comparaison de la co-occurrence des mots-clés dans trois contextes (Source : Auteur,2022)

Etude	Mots-clés	Occurrences	Total link strength
La région MENA (2000-2021)	Sustainability	43	362
	Rating System	33	261
	Energy	32	273
	Survey	31	277
	Green building	30	252
A scientometric analysis and visualization of green building research in Africa (2000-2020) [11]	Sustainable development	82	293
	Sustainable construction	38	137
	Intelligent buildings	37	132
	Green building	26	87
	Energy efficiency	25	71
Scientometric review of global research trends on green buildings in construction journals [22]	Sustainability	149	119
	Green building	137	114
	Sustainable construction	113	68
	LEED	57	49
	Energy efficiency	46	42

La force du lien entre deux mots-clés est calculée en fonction du nombre d'articles dans lesquels les mots-clés apparaissent ensemble et plus le lien est fort, plus la ligne du réseau est épaisse. De plus, les mots-clés proches indiquent leur co-occurrence dans les articles de recherche. Chaque groupe désigne les mots-clés qui coexistent le plus fréquemment. Des mots-clés tels que l'application, la conscience, les barrières, l'industrie de construction, les bénéfices, implémentation, politique et la construction durable coexistent fréquemment. En plus des domaines environnementaux et socio-économiques auxquels la recherche GB a traditionnellement appartenu, de nouvelles disciplines liées à la construction écologique dans les domaines de la psychologie, de l'éducation et de la santé sont apparues. Cela indiquait que la recherche sur les GB est devenue indissociable du bien-être des occupants, l'acceptation psychologique et du développement social. Ce qui montre une tendance transversale multidisciplinaire.

En complément de la figure 13, le tableau 3 fournit des statistiques des variations de la taille des nœuds et de la force totale des liens (Total link strength) des mots-clés dans des contextes différents. Il montre les mots-clés « Durabilité » et « Construction écologique » en tête de tendances de recherche scientifique dans les deux études soit en Afrique ou niveau mondial. En revanche, les études dans la région MENA s'intéressent plus au développement des systèmes nationaux d'évaluation de la durabilité des bâtiments dans leur contexte. Le classement des domaines de recherche (Tableau 3) et la relation entre les domaines comme indiqué dans la figure 13 mettent en évidence deux principaux domaines de recherche actuels dans la région MENA, à savoir :

- *Cluster 1 (rouge) : implantation et déploiement de GB*

Le développement des bâtiments verts rencontre des obstacles communs à tous les pays en développement, mais à des degrés différents. Cependant, les taux d'adoption des bâtiments verts dans les pays de la région MENA semblent encore lents. Nous détaillerons cet axe dans le chapitre 3 de cette partie.

- *Cluster 2 (bleu) : Évaluation de la performance en matière de la durabilité*

Les certifications des bâtiments verts ont acquis une reconnaissance dans la région MENA, sont LEED, BREEAM et HQE dans les pays francophones (Maroc, Algérie et Tunisie)[8]. En l'absence des systèmes de notation dans les pays de la région MENA. Les chercheurs ont utilisé des référentiels occidentaux comme point de départ pour développer conformément aux enjeux de durabilité en fonction du contexte particulier. Ali *et al*.(2009)[16], Saleh *et al*.(2013,2015) et Mneimneh *et al*. (2011)[75] ont conçu un référentiel d'évaluation des bâtiments verts adapté au contexte jordanien/saoudien/ Libanais reflétant les conditions locales [76]. En parallèle avec les travaux de la recherche ; les conseils du bâtiment vert de quelques pays de la région MENA, comme l'Arabie saoudite (KSA), Qatar, Liban,

Égypte et Emirats ont développé leurs systèmes d'évaluation de durabilité des bâtiments, comme le montre le tableau 4.

Tableau 4 : Systèmes de certifications développées dans la région MENA

	QSAS	PRS	GPRS	ARZ	IS5281	Mostadam
Pays	Qatar	UAE	Égypte	Liban	Israël	KSA
Année de la création	2009	2010	2011	2011	2014	2019

Cela montre qu'un tiers des pays de la région MENA ont un système national de certification de la durabilité des bâtiments contre l'absence des pays au nord de l'Afrique (Maroc, Algérie et Tunisie). D'où l'intérêt de développer un référentiel d'évaluation de durabilité dans le contexte du Maroc, ce sera notre objectif dans la deuxième partie.

1.3.9. Réseaux de collaboration scientifique dans GB

La connaissance des réseaux de collaboration scientifique actuels dans la région MENA peut favoriser l'accès aux spécialistes et experts du domaine des GB. Dans cette perception, une analyse du réseau de co-auteurs institutionnels et selon les pays dans les 159 articles produits dans la région MENA sont présentés dans cet axe. Le réseau de collaboration scientifique des pays aide à apprécier les pays (les institutions) qui sont actifs dans le domaine de recherche concerné. Il est utile pour aider les partenariats de recherche par des programmes universitaires d'échanges et des mobilités dans le domaine des bâtiments verts entre les pays de la région MENA. Le type d'analyse était le « Co-auteur », l'unité d'analyse était les « Organisations » et la méthode de comptage le « Comptage fractionnaire». Dans cette analyse, nous n'avons pas exigé le nombre minimum de documents ni le nombre minimum de citations d'une organisation. La figure 14 montre que seulement neuf instituts de la région MENA arrivent à faire des liens de collaboration sur les 58 organisations ; trois instituts tunisiens ont collaboré avec deux unités de recherche saoudiennes, à savoir l'université du Roi Abdelaziz et l'université Djeddah. Cette dernière a des liens de recherche avec des instituts nationaux comme l'université princesse Noura Abdul Rahman, et d'autres régionaux avec l'université irakienne de développement humain. L'université du Roi Abdelaziz (KSA) coopère avec les différents instituts de deux clusters (rouge et vert) et avec l'université égyptienne Helwān.

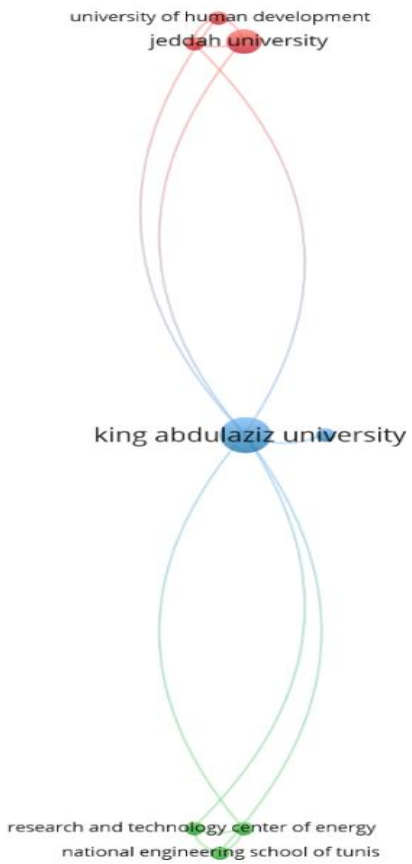


Figure 14: Réseau de collaboration dans la région MENA (2000-2021) (Source : Auteur,2022 [69])

Tableau 5: Cinq top institutionnel production scientifique en GB

Institution	Pays	Documents
Qatar university	Qatar	6
Ben-Gurion University	Israël	4
Islamic azad university	Iran	4
Jordan university of science and technology	Jordanie	4
Sultan Qaboos University	Oman	4



Figure 15: Carte du réseau de collaboration de 9 tops instituts dans la région MENA (Source : Auteur,2022 [69])

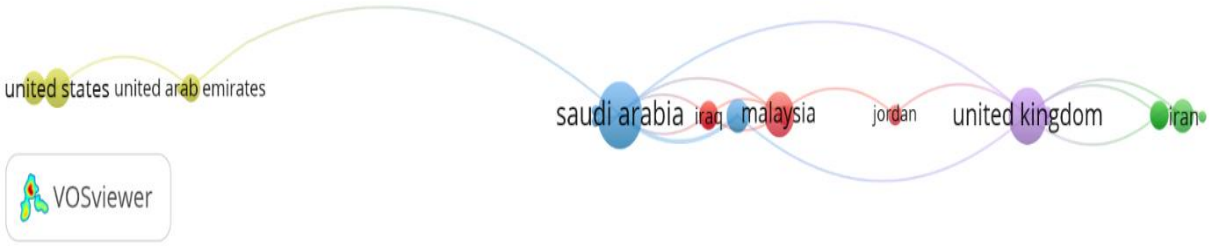


Figure 16: Carte du réseau de co-auteurs des pays basées sur les valeurs « Total link strength » (Source : Auteur,2022 [69])

Au contraire, les institutions les plus productives dans la recherche scientifique dans la région comme Qatar, Israël et l'Iran (Tableau 5 et Figure 15) ne présentent pas des travaux collaboratifs avec les universités interrégionales ; mais plutôt des coopérations Sud-Nord intéressantes avec le Royaume-Uni, Australie, Malaisie et les États-Unis. Ceci se confirme par l'analyse du réseau de collaboration scientifique des pays (Figure 16). Le Royaume-Uni est le premier pays le plus influent dans le réseau de collaboration en GB avec les pays : l'Arabie saoudite, Iran, Jordanie et l'Égypte. Alors que le rang le plus élevé de l'Arabie saoudite en parallèle avec le Royaume-Uni coïncide avec le taux élevé de contribution des ambassadeurs de recherche en Arabie saoudite (Annexe A). Cependant, les liens avec les États-Unis sont relativement peu forts avec les Émirats arabes unis et Qatar. Cela pourrait s'expliquer par les proximités géographiques, culturelles, historiques, linguistiques et sociopolitiques.

C’est par exemple le cas du Royaume-Uni qui est le pays préféré de destination pour les échanges universitaires ou l’exode des cerveaux de ses anciennes colonies dans la région MENA, en particulier des pays du Golfe tels que les émirats unis et le Qatar.

Les chercheurs d’Égypte et de Jordanie ont principalement émigré en Arabie saoudite, avant les États-Unis [77]. La France semble être l’une des destinations préférées des scientifiques des pays du nord Afrique tels que le Maroc. Ces relations collaboratives se traduisent par des facilités de mobilité scientifique en accordant des visas scientifiques-chercheurs et les appels de projets bilatéraux. En effet, les changements et l’instabilité politique comme en Syrie et au Yémen et les interdictions de voyager affectent les liens de mobilité de la figure 16, comme dans le cas de l’Iran [78].

1.4. Résumé

Ce chapitre présente l'analyse scientométrique des tendances et de la structure de la recherche dans la région MENA sur la période 2000-2021, en utilisant des analyses telles que les co-auteurs, les co-mots, les co-citations et les clusters. Un total de 159 articles scientifiques des bases de données telles que : Scopus, Web of Science ont été traités. Les résultats révèlent une augmentation de la production scientifique depuis l’année 2001 par un article à 25 articles en 2021 dans la région MENA, pendant cette période les principales contributions provenant principalement des pays du Golfe, tels que l’Arabie saoudite (27), Emirates arabes unis par 16 publications. Les « Ambassadeurs scientifiques » de l’Arabie saoudite ont contribué par 13 articles et ils sont installés dans des centres de recherche étrangers. En revanche, les unités de recherche locales de l’Egypte ont publié plus de 80 % des articles. Cela montre leur effort pour développer des recherches sur les bâtiments verts.

A travers la visualisation des liens de cooccurrence des mots-clés, deux thématiques de recherche ont émergé dans la région MENA. La première s’articule autour de la transition de la performance énergétique vers une performance environnementale plus globale, tandis que la deuxième thématique concerne les paradigmes de développement des bâtiments verts.

Par ailleurs, les laboratoires de recherche au Maroc ont apporté une contribution, par deux articles liés à la thématique « Bâtiment vert ». La première étude de Slaoui *et al*.(2018)[79] a traité l’architecture durable d’un projet de campus universitaire à Fès, et le deuxième article a évalué la performance environnementale de deux mosquées pendant la phase d’occupation à Marrakech [80].

CHAPITRE 2 : État des lieux des bâtiments verts à l'échelle nationale

2.1. Introduction

Au fur et à mesure que la conscience environnementale s'est renforcée et que les défis liés au changement climatique ont pris de l'ampleur, de nombreux pays et organismes internationaux ont introduit des normes, des codes et des systèmes de certification pour promouvoir des bâtiments verts. L'agenda des Nations Unies pour le développement durable comporte, notamment à travers les Objectifs de Développement Durable (ODD), elle a fixé des objectifs, comme ODD n° 11 : « villes et communautés durables » visant à encourager l'évolution vers des bâtiments durables et résilients [8]. De plus, la Global Alliance for Buildings and Construction, lancée lors de la COP21 à Paris, s'efforçait de rassembler les acteurs du secteur du bâtiment et les gouvernements pour faciliter la transition vers une industrie des bâtiments bas carbone et à haute efficacité énergétique [81]. En revanche, au niveau international diverses organisations non gouvernementales jouent un rôle actif dans la promotion de la durabilité dans le secteur du bâtiment. Le World Green Building Council, travaille en étroite collaboration avec les gouvernements, les organisations internationales et les acteurs clés pour influencer les politiques en faveur de la durabilité dans le secteur de la construction [40].

Au Maroc, des stratégies et des programmes ont été mis en œuvre pour atteindre les 17 ODD dans le cadre de la Stratégie Nationale de Développement Durable 2016-2030. Pendant ce chapitre, nous examinerons les stratégies et les engagements en faveur de la durabilité dans le secteur du bâtiment au Maroc. Ensuite, nous explorerons la réglementation internationale et nationale en matière de construction durable, l'offre d'enseignement et de formation, ainsi que le déploiement de la certification des bâtiments verts.

2.2. Engagement à l'échelle internationale en bâtiment vert

L'engagement international en faveur des GB se manifeste à travers différentes initiatives, cadre législatif, accords et collaborations. Des organisations telles que l'Union européenne, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et d'autres organismes internationaux ont adopté des normes et des politiques visant à promouvoir la durabilité dans le secteur du bâtiment. De plus, de nombreux pays ont fixé des objectifs de réduction de la consommation d'énergie, de promotion des énergies renouvelables à l'échelle du bâtiment et le déploiement de la certification des bâtiments verts.

2.2.1. Réglementation thermique des bâtiments

Les réglementations qui ont un caractère obligatoire en matière du GB peuvent citer le « Règlement thermique des bâtiments » développé depuis le premier choc pétrolier de l'année 1973 et mis en œuvre dans le but de fixer une limite maximale à la consommation énergétique des bâtiments. Cependant, la couverture actuelle des règlements thermiques (RT) des bâtiments est loin d'être universelle. Les RT existants ne sont généralement pas alignés sur l'atteinte d'un objectif net zéro d'ici

à 2050 [82]. A la fin de l'année 2022, 80 pays présentaient des règlements thermiques, dont 43 pays avaient des RT obligatoires pour les bâtiments résidentiels et non résidentiels (Figure 17). Cependant, au cours des dernières années, plusieurs pays à travers le monde ont eu du mal à appliquer le règlement thermique pour faire progresser vers les objectifs de l'alliance mondiale des bâtiments. L'étendue actuelle des RT des bâtiments dans le monde montre que l'Afrique subsaharienne et l'Amérique du Sud et centrale ont le moins de règlements obligatoires. Cependant, il y a quelques signes de changement, notamment par le biais du Code régional du bâtiment pour l'efficacité énergétique de la CARICOM (zone entre l'Amérique du Nord et du Sud), qui est actuellement mis en œuvre dans toute la Caraïbe.

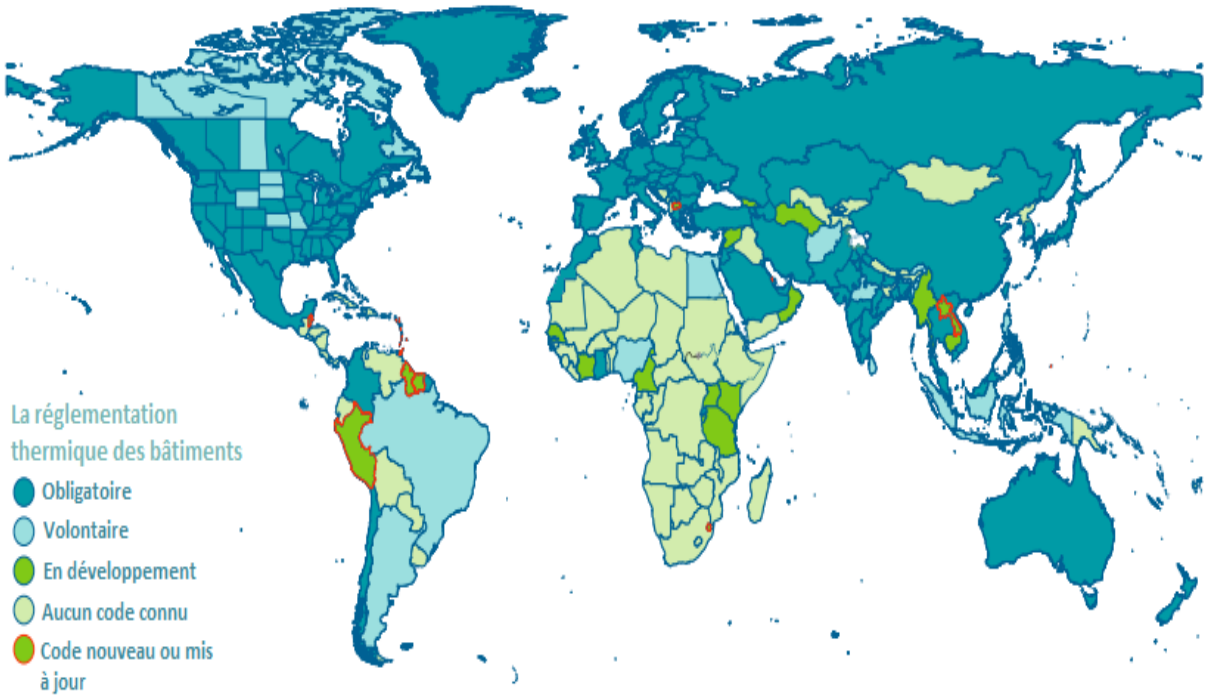


Figure 17: Règlement thermique du bâtiment par pays/état [82]

Le Maroc, la Tunisie et l'Arabie saoudite ont des règlements thermiques obligatoires qui couvrent l'ensemble du secteur des bâtiments. Le Ghana et le Nigeria ont des codes qui encadrent une partie du secteur (bâtiments industriels), tandis que l'Égypte, l'Afrique du Sud et Kuwait ont des règlements volontaires.

2.2.2. Normalisation internationale relative aux bâtiments verts

Au niveau de normalisation, dans le secteur du bâtiment, on trouve deux principaux systèmes internationaux liés à la durabilité des bâtiments à savoir : la série de normes publiées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'ASHRAE. Rappelons qu'une norme est un ensemble de lignes directrices ou des normes / des exigences par rapport auxquelles un produit ou un service peut être jugé. L'ISO définit ainsi une norme comme : « un document, établi par consensus, approuvé par un

organisme reconnu qui prévoit une utilisation commune en tant que règle, ligne directrice ou caractéristique pour des activités ».

La norme ASHRAE : L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers est un organisme américain à but non lucratif fondé en 1894. Il regroupe principalement les spécialistes dans les domaines ventilation, de climatisation et de chauffage et la durabilité dans l'industrie du bâtiment. Cet organisme mène des projets de recherche et publie des normes et de la documentation techniques avec un accès gratuit en mode de lecture. Parmi les normes spécifiques aux performances de la durabilité, la norme considérée est ANSI/ASHRAE/USGBC/IES 189.1-2020, « Standard for the Design of High-Performance Green Buildings ». Cette norme est complète et comprend des chapitres surs : le site, l'eau, l'efficacité énergétique, la qualité de l'environnement intérieur et les matériaux. Elle fournit des exigences minimales pour la durabilité du site pendant les phases de vie du bâtiment.

ISO : L'Organisation internationale de normalisation et le Comité européen de normalisation (CEN) ont travaillé activement ces dernières années sur les lignes directrices pour les évaluations environnementales des matériaux de construction et de la durabilité des bâtiments. À la suite du comité technique ISO (TC) 59, « Construction de bâtiments », et de son sous-comité (SC) 17, « Développement durable dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil », ont développé une normalisation volontaire des méthodes d'évaluation des aspects de durabilité des ouvrages de construction nouveaux et existants et des normes pour les déclarations environnementales de produits (EPD) de construction. La majorité de ces normes d'ISO (Annexe D) se concentrent sur les performances environnementales des bâtiments et les matériaux de construction. En 2017, la norme ISO 15686-5 :2017, fournit des exigences et des lignes directrices pour effectuer des analyses du coût du cycle de vie (LCC) des bâtiments qu'ils soient neufs ou existants. En 2005, le CEN a créé le Comité Technique (TC) 350, « Durabilité des ouvrages de construction », qui vise à développer une normalisation dans les pays de l'union européenne. À la suite des travaux menés à ce jour, on trouve la norme EN 15643-1 :2021, relative à l'évaluation des bâtiments et des ouvrages de génie civil en matière de performance environnementale, sociale et économique, en prenant en considération les caractéristiques techniques et fonctionnelles de tout type de bâtiment que ce soit neuf tout au long de leur cycle de vie ou existant.

2.2.3. Codes nationaux en termes des bâtiments verts

Au niveau des pays, des codes des bâtiments verts continuent d'être élaborés et adoptés aux différents pays qui visent à pousser le niveau des performances de durabilité des bâtiments. Ces codes fixent des exigences qui visent à réduire les impacts négatifs et à augmenter les impacts positifs d'un bâtiment sur l'environnement et ses occupants. Nous citons des exemples des pays avancés dans le déploiement d'une réglementation verte dans l'industrie du bâtiment.

Les États-Unis ont pris plusieurs engagements en réglementation, normes et des programmes fédéraux volontaires pour déployer la construction durable. Notamment, la norme ICC 700 nationale Green Building Standard (NGBS) est la première norme de construction écologique résidentielle développée pour la première fois en 2008. Au niveau des Etats ont été adoptés des normes régionales aux termes des bâtiments verts, comme la norme « California Green Building Standards » (CALGreen), qui établissent des exigences strictes en matière d'efficacité énergétique, d'utilisation de l'eau, de matériaux durables et d'autres aspects environnementaux. Ces réglementations et normes varient selon l'État et certains États peuvent avoir des normes plus strictes que celles établies au niveau fédéral. Parallèlement des programmes volontaires tels que le système de certification des bâtiments LEED et le programme ENERGY STAR certifie les bâtiments, les appareils et les équipements économes en énergie.

Au Royaume-Uni, le Code de l'habitat durable et l'Energy Performance Certificates (EPC) pour la construction fixent les exigences minimales en termes d'efficacité énergétique et d'utilisation de l'eau pour les bâtiments. Le Code des maisons durables (Homes Standard) est une méthode d'évaluation environnementale des maisons neuves qui évalue la performance environnementale d'un bâtiment pendant les phases de conception et de post-construction, qui vise à rendre les nouveaux bâtiments construits à partir de 2025 « Net Zero Carbon Buildings ». Le Code exige des normes d'efficacité énergétique plus élevées et encourage l'utilisation de technologies renouvelables.

D'autre part, la Commission européenne a publié de nombreuses politiques et législations ayant un impact sur l'industrie des bâtiments, certaines visant l'efficacité énergétique des bâtiments. Comme, la directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) établit des exigences pour l'efficacité énergétique des nouveaux bâtiments et des rénovations. De plus, la Commission européenne a mis en place un système d'évaluation de durabilité des bâtiments i.e. Level (s), en 2020.

Dans les pays en développement, comme la municipalité de Dubaï a publié le règlement « Al Sa'fat» – Green Building, qui exige que tous les nouveaux bâtiments gouvernementaux à Dubaï doivent être des bâtiments verts. Depuis la publication de la version 2.0 Al SA'FAT en 2020, toutes les exigences qui avaient été fixées doivent être respectées (niveau : Argent) afin de délivrer le permis de construction. Ces exigences obligatoires du règlement sont : efficacité énergétique, utilisation des appareils éco hydriques, efficacité du système d'arrosage et contrôle la qualité de l'air à l'intérieur. D'autre part, des exigences volontaires : utilisation des énergies renouvelables, réutilisation des eaux grises, la durabilité du site, éviter les îlots de chaleur et la gestion durable des déchets [83].

En Arabie Saoudite, en 2018, le Comité national du Code du bâtiment saoudien (SBCNC) a publié une série des nouveaux règlements du bâtiment (SBC). Depuis lors, le code doit être appliqué à tous les types de bâtiments, y compris les bâtiments tertiaires et résidentiels. Le Code saoudien du bâtiment vert, SBC 1001-CR, fait partie intégrante du SBC 2018 ; cependant, il est facultatif et attire l'attention

sur la protection de l'environnement, la santé publique, la sécurité et le bien-être. En 2019, le Conseil saoudien de la construction verte (Saudi Green Building Council) a été créé pour promouvoir la durabilité dans le secteur de la construction et pour développer des normes spécifiques aux bâtiments verts. Ces engagements démontrent que des pays ont avancé de promouvoir la durabilité dans le secteur du bâtiment.

La suite du chapitre nous analysons les engagements du Maroc dans le secteur du bâtiment, d'après les éléments suivants : la réglementation nationale, institutionnelle, les formations universitaires et le déploiement de la certification des bâtiments verts.

2.3. Engagement du Maroc en matière de développement durable et du changement climatique dans le secteur du bâtiment

2.3.1. Maroc : données nationales

Le contexte environnemental et socioéconomique du Maroc joue un rôle crucial dans la compréhension des défis et des opportunités liées aux bâtiments verts dans le pays.

- Données environnementales

Le Maroc, dépourvu de ressources énergétiques conventionnelles fossiles, dépend entièrement du marché international pour son approvisionnement en sources d'énergie pour répondre aux besoins croissants associés résultant de l'expansion économique et démographique. Les combustibles fossiles représentent 89 % de l'approvisionnement en énergie primaire (pétrole 62 %, le charbon 21.70 % et le gaz 5 %) et 11 % en énergies renouvelables pour l'année 2020 (données AIE,2020 [84]). Pendant la période de 2009 à 2020, le taux de croissance a été en hausse avec une moyenne de 4.50 %, entraînant une augmentation de la consommation d'énergie de 15.10 millions de TEP en 2009 à 24.75 millions de TEP en 2020 (Figure 18).

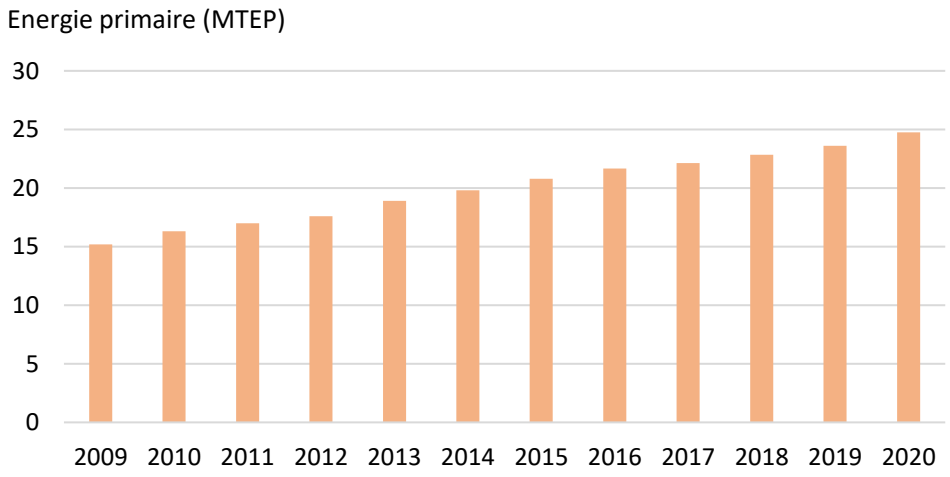


Figure 18: Evolution de la consommation d'énergie primaire au Maroc [85]

Cette tendance a également été observée pour l'électricité, où le taux a augmenté de plus de 34 % depuis 2007, avec une consommation totale d'électricité de 33.50 TWh à la fin de 2020 (données

AIE,2020 [84]) et les émissions des gaz à effet de serre ont atteint environ 62MtCO_2 la même année. Parmi les différents secteurs, la consommation d'énergie finale est principalement concentrée dans trois secteurs, à savoir le transport (41 %), le secteur résidentiel (25%) et l'industrie (19 %), qui représentent ensemble 85 % de la consommation finale d'énergie.

Au niveau du climat, le Maroc est un climat montagnard, méditerranéen et désertique selon la classification de Köppen avec une légère variation des conditions climatiques au cours de l'année. Pendant l'élaboration de la réglementation thermique de construction, le territoire marocain est divisé en six zones climatiques en fonction des degrés hivernaux et estivaux (Figure 19), ces zones sont représentées climatiquement par des villes. L'annexe (E) présente la température extérieure annuelle de ces villes. La température à Agadir (Z1) est majoritairement comprise entre 14 et 25°C. Des chaleurs extrêmes peuvent être observées certains jours en été, très souvent durant le passage du Chergui (air saharien). Tanger (Z2) présente moins de périodes de chaleur intense et des hivers légèrement plus froids par rapport à Agadir. Le climat modéré de ces deux villes est influencé par leur proximité avec la mer Méditerranée et l'océan Atlantique, ce qui entraîne une humidité élevée.

Ifrane (Z4), située dans les montagnes du Moyen Atlas à une altitude de 1665 mètres, avec un climat hivernal très froid, avec des températures avoisinant les 0°C, notamment la nuit et tôt le matin.

La ville Fès (Z3) se distingue par des étés très chauds, tandis que les hivers sont modérément froids en raison de l'influence des masses d'air provenant de l'Atlas. Le climat de Marrakech (Z5) est très similaire à celui de Fès, avec des hivers légèrement moins froids et des étés légèrement plus chauds en raison de l'apport d'air chaud provenant du Sahara. La ville d'Errachidia (Z6) est caractérisée par des températures élevées. En hiver et au printemps, les températures peuvent varier de 4 °C à 24 °C au cours de la même journée

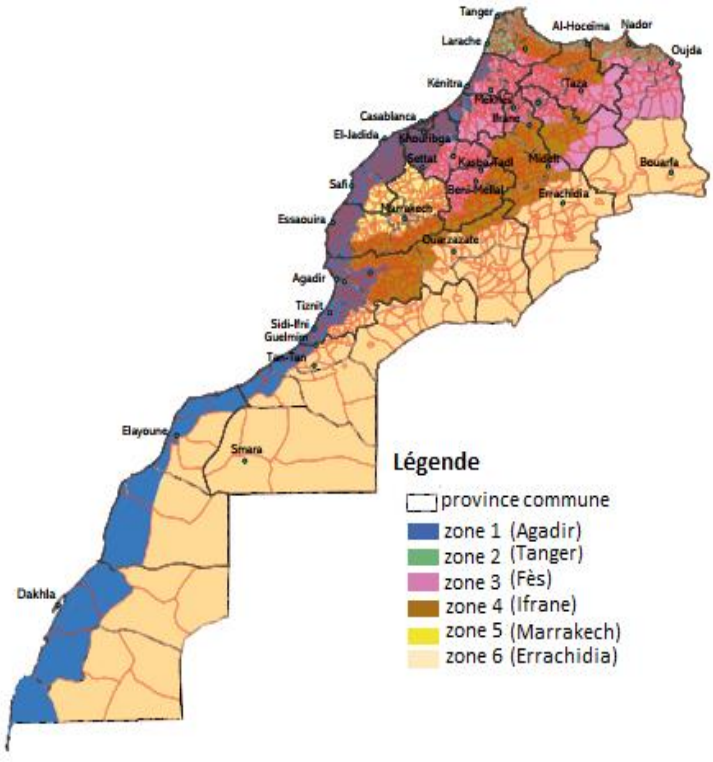


Figure 19: Zonage climatique du Maroc dans le cadre de la RTCM

, tandis qu'en été, elles dépassent souvent les 35°C. Ces caractéristiques sont principalement dues à la position géographique de la ville, entre le Haut-Atlas et le Sahara.

Les données de température extérieure annuelle de ces zones, générées à l'aide du logiciel Meteonorm 8.0.3, nous permettent de tracer le diagramme de confort (conformément aux normes ASHRAE 55-2004 PMV) à l'aide de l'outil logiciel Climate Consultant 6.0. Deux exemples sont illustrés à la figure 20, mettant en évidence que les conditions de confort thermique varient d'une zone à l'autre, avec un pourcentage de 82.20 % de la zone la plus froide Ifrane au Maroc et de 74.60 % à Marrakech se situant en dehors de la plage de confort thermique humain. Cela se traduit par des degrés-heures de chauffage, avec la valeur maximale à Ifrane (81062 DHCH), la valeur moyenne à Fès (38469 DHCH) et la valeur minimale à Agadir (24761 DHCH).

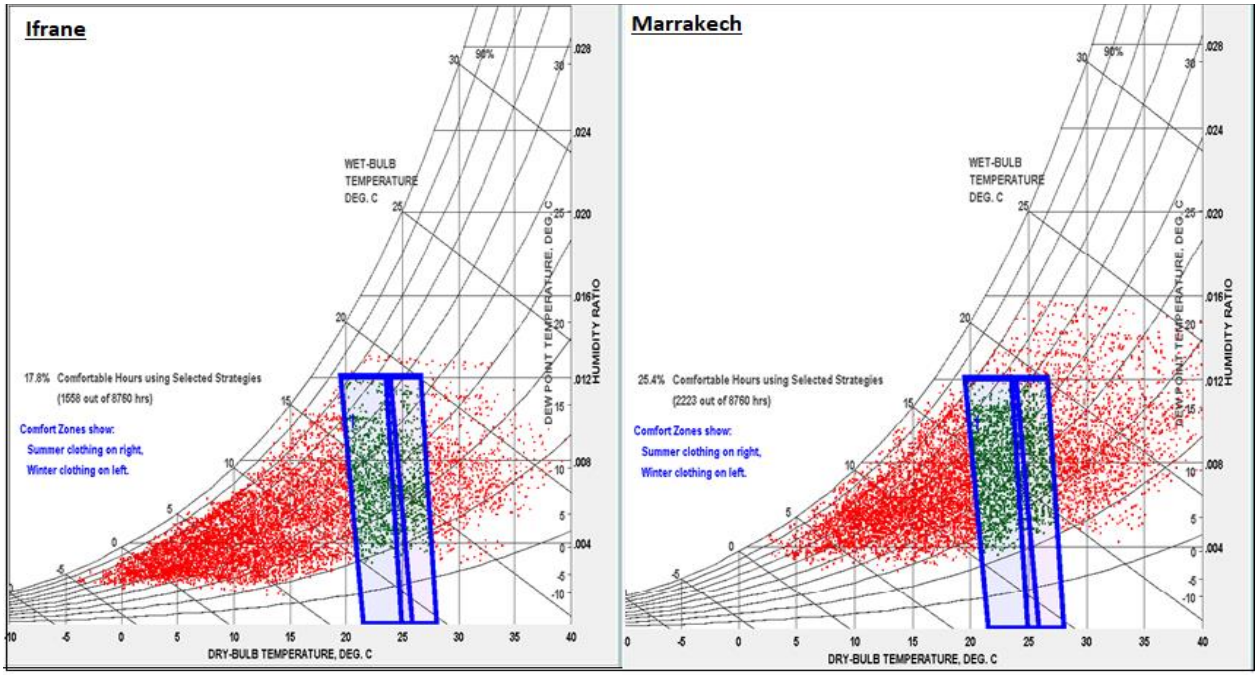


Figure 20: Horaires d'inconfort thermique interne (Source : Auteur,2023)

De même, les degrés-heures de refroidissement, avec le nombre maximal à Errachidia (12121 DHCL) et le nombre minimal à Ifrane (839 DHCL), sont nécessaires pour assurer un confort thermique approprié [86]. Il est prévu que d'ici à 2050, les températures de l'air ambiant seraient supérieures aux valeurs actuelles selon les scénarios climatiques d'émission du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

- Données socio-économiques

Au 1er juillet 2022, la population du Maroc atteint 37 millions d'habitants, avec une concentration notable à Casablanca, où vivent 7.60 millions habitants; avec 64.30 % en milieu urbain, est le résultat de l'exode rural, de l'expansion urbaine et du reclassement de certaines zones rurales [87]. Cette tendance a modifié la structure familiale, passant en moyenne de 4.70 ménages par famille en 2004 à 3.83 en 2022 [87]. Cette transition démographique s'accompagne d'une demande croissante en logements, qui atteignait 1500000 unités en milieu urbain à la fin de 2021, en particulier pour des logements sociaux de 2 à 3 pièces [87].

Au niveau social, des inégalités sociales au Maroc, mesurées par l'indice de Gini (inégalité des revenus), s'élèvent à 38.50 % en 2019, soulignant les disparités économiques dans le pays. De plus, l'indicateur d'inflation sous-jacente a connu une augmentation de 5.80 % au cours de l'année 2022 par rapport à 2021. Selon l'enquête du Haut-Commissariat au Plan en 2023 [87], plus de 8 ménages sur 10 déclarent une dégradation de leur niveau de vie au cours des 12 derniers mois et ils ont estimé que ce n'est pas le moment idéal pour effectuer des achats de biens durables.

- Objectifs de développement durable au Maroc

Le Maroc s'engage à mettre en œuvre les objectifs de développement durable en tenant compte de son contexte spécifique. Selon la plateforme SDG index [88], le Maroc se classe 70e sur 166 dans le Rapport de développement durable de 2023, avec un score de 70.90 %, par rapport à 64.70 % en 2010. La figure 21, représente les performances du Maroc en relation avec les 17 ODD.



Figure 21: Tableau de bord des 17 ODD au Maroc [89]

Les indicateurs montrent que le Maroc se rencontre majeur défi par rapport à l'ODD 3 (bonne santé et bien-être), à l'ODD 7 (Energie propre et d'un coût abordable) et les ODD 5, 8, 14 et 16. Le Maroc est sur la bonne voie pour atteindre les cibles de l'ODD 6 et 17. Le Maroc s'améliore modérément par rapport à l'ODD 10 et sur l'ODD 11 du développement des villes et communautés résilientes et durables. En relation avec le sujet de la thèse, les bâtiments verts/durables peuvent contribuer dans l'amélioration des cibles faibles des ODD suivantes : « 3. Bonne santé et bien-être », « 6. Eau propre et assainissement », 7, 11 et « 12. Consommation et production responsables ». A titre exemple, les GB peuvent améliorer la notation de la cible « Prélèvement d'eau douce » de l'ODD N°6 par l'économie de l'eau et la réutilisation des eaux traitées.

- Typologie des bâtiments résidentiels au Maroc

Au niveau de la typologie des bâtiments résidentiels (sujet de cette thèse) au Maroc, on trouve quatre grandes catégories : maisons marocaines modernes (mono ou multi générations de mêmes familles), immeubles qui contiennent un certain nombre d'appartements (multi familles), des villas et des maisons traditionnelles (Figure 22). D'après le recensement RGPH 2014 [90] sur la situation du parc de logement, en milieu urbain, la répartition des ménages selon le type du logement occupé montre que 65 % du parc est constitué des maisons marocaines modernes, la part des appartements représentant 17.50 % et les villas 3.30 %.



Figure 22: Catégories des bâtiments résidentiels marocains, où (a) montre une maison marocaine moderne, (b) montre un immeuble, (c) montre une maison traditionnelle et (d) une villa moderne

En revanche, la part des ménages occupant des maisons traditionnelles est de 5.50 %. Ces maisons traditionnelles ont généralement été construites avant 1980 avec une architecture antique, l'architecture Amazighe, arabo-andalou. Qu'elle se base sur le savoir-faire et des matériaux de construction locaux tels que la terre crue, la pierre et des produits de finition traditionnels tels que les enduits en argile (« Tadelakt ») (Tableau 6).

Tableau 6: Caractéristiques des bâtiments résidentiels au Maroc (Source : Auteur,2023[69])

Typologie du bâtiment	**Surface (m²)**	**Nombre d'étages**	**Nombre de pièces**	**Nature des matériaux de construction**
Maison marocaine moderne	84-160	R+2 à R+4	3 à 5	Béton armé, mortier de ciment, pierres pour la couche de la fondation, briques et les hourdis, plâtre (enduit intérieur) et les matériaux de finition.
Immeuble	59-91	R+3, ou plus	3 à 5	
Villa	> 200	R+1	5 ou plus	
Maison traditionnelle	80 ou plus	R, R+1 ou parfois plus	4 pièces ou plus	Pierre, béton de propreté, maçonnerie en adobe ou maçonnerie en briques cuites, enduit de terre +fibres végétales (paille), terre argileuse, terre (mortier, brique (Adobe)), poutres en bois, roseaux ou autres.

Après l'architecture coloniale, l'industrie du bâtiment est basée sur le béton armé et la brique rouge, alors les caractéristiques architecturales dépendent de la typologie du bâtiment (Tableau 6) et la superficie de la maison marocaine moderne varie de 80 à 160 m² avec une largeur minimale allant de 7 à 10 m et une hauteur de construction de 11.50 m soit un R+2, pouvant atteindre un R+4 dans certaines zones.

2.3.2. Stratégie nationale de développement durable

Le Maroc a mis en œuvre plusieurs politiques pour atteindre les 17 objectifs de développement durable, dans le cadre de la stratégie nationale de développement durable (SNDD) 2030, qui comprend une série d'initiatives, de programmes et de projets conformes à l'agenda des Nations Unies liés aux ODD. Pour réaliser ces objectifs, sept enjeux majeurs ont été décomposés en 31 axes stratégiques. Dans ce contexte, des plans d'action sectoriels de développement durable ont été élaborés pour préciser la contribution de chaque département à la mise en œuvre de la SNDD. De plus, un plan d'action visant à promouvoir l'exemplarité de l'État en matière de mise en place du concept d'administration écologique a été développé.

Le premier axe stratégique de l'enjeu gouvernance a ciblé 35 bâtiments publics qui s'engagent dans une démarche environnementale et 10 certifiés par les systèmes internationaux HQE, BREEAM ou autres avant la fin d'année 2020, mais à l'heure actuelle aucun projet n'a été certifié. La SNDD est concentrée plutôt sur l'axe d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment, qui se base sur la stratégie nationale d'efficacité énergétique (2009-2030). Cette stratégie s'est traduite par la mise en œuvre d'un cadre législatif et institutionnel, visant à pérenniser les fondements d'un modèle énergétique efficient.

2.3.3. Engagements du Maroc dans le cadre de la CCNUCC

Depuis le Sommet de Rio en 1992, le Maroc a ratifié la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en 1995, ainsi que l'Accord de Paris en 2016. Le Maroc a ainsi pris des engagements envers la CCNUCC, notamment en :

- L'élaboration régulière de sa Contribution Déterminée au niveau National (CDN), qui inclut notamment la réalisation de l'inventaire national des gaz à effet de serre, afin de rendre compte de ses actions et de ses progrès en matière de lutte contre le changement climatique.
- Elaboration des mesures d'atténuation appropriées au niveau national (NAMAs) : agriculture, habitat, déchets, tourisme ou encore transport.

Il convient de noter les projets NAMA, spécifiquement destinés aux pays en développement. Les résultats des projets NAMA doivent déclarer leurs contributions à l'atténuation via le « Biennial Update Report (BUR) ». La figure 23 illustre le cadre stratégique de développement durable et de lutte contre le changement climatique en lien avec le secteur du bâtiment. Nous analysons les programmes et les

projets d'atténuation dans le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) dans les rapports suivants : NAMA-Habitat version BUR 1-2016 et BUR 2 en 2019 [91] et dans la quatrième communication nationale de 2021 [92].

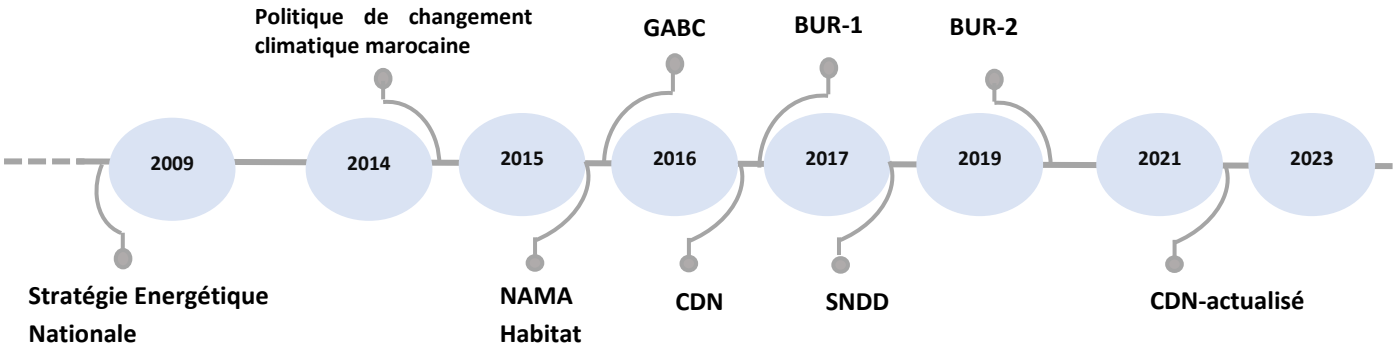


Figure 23: Chronogramme de l'engagement du Maroc de lutte contre le changement climatique en lien avec le secteur du bâtiment (2009-2023), GABC : Global Alliance for Buildings and Construction (Source : Auteur,2023)

Les programmes et les mesures d'atténuation dans le secteur du bâtiment sont :

- Le programme de généralisation des lampes LED dans le secteur résidentiel à l'horizon 2030 ;
- La mise en place d'un plan national de développement des chauffe-eaux solaires, exploitant le potentiel solaire important du Maroc avec plus de 3000 heures d'ensoleillement par an et une irradiation de plus de 5.60 kWh/m²/jour. Ce programme vise à promouvoir la filière solaire thermique en prévoyant le développement d'une superficie moyenne de 40000 m²/an de chauffe-eau solaire sur deux périodes, de 2010 à 2020 et de 2020 à 2030 ;
- La mise en place d'une norme minimale de performance énergétique pour les réfrigérateurs : ce programme consiste en l'étiquetage des réfrigérateurs et congélateurs domestiques ayant un volume de stockage compris entre 10 et 1500 litres ;
- La mise en place d'une norme minimale de performance énergétique pour les climatiseurs ;
- La promotion de l'efficacité énergétique dans les nouveaux bâtiments : cela implique l'application de la Réglementation Thermique de la Construction au Maroc (RTCM) dans les bâtiments résidentiels et tertiaires neufs ;
- La promotion de l'installation de panneaux photovoltaïques sur les toits des bâtiments : implique l'objectif d'installer une capacité totale de 1000 MWc d'énergie solaire photovoltaïque d'ici à 2030.

Le tableau 7 présente le cumul des émissions évitées d'ici à 2030 (Gg Eq. CO_2) par ces stratégies, ainsi que le coût estimatif pour chaque programme. Les cinq mesures du scénario inconditionnel, évaluées à un coût approximatif de 26 milliards MAD, contribuent à une réduction cumulée des émissions de gaz à effet de serre évitées entre 2020 et 2030 de 18418.30 Kteq CO_2, ce qui représente 5.60 % du

cumul des émissions du scénario de référence du secteur du bâtiment pour la même période [91]. Les deux mesures du scénario conditionnel, évaluées à un coût approximatif de 11 milliards MAD, permettent de réduire le cumul des émissions évitées entre 2020 et 2030 de 5119.50 Kteq CO_2, soit 1.90 % du cumul des émissions du scénario de référence du secteur du bâtiment pour la même période. L'ensemble des mesures, estimées à un coût approximatif de 37 milliards MAD, permettent de réduire le cumul des émissions évitées entre 2020 et 2030 de 23537.80 Kteq CO_2, représentant ainsi 7.60 % du cumul des émissions du scénario de référence du secteur du bâtiment pour la même période [91].

Tableau 7: Récapitulatif des mesures d'atténuation préconisées dans le secteur du bâtiment (2020-2030)[91]

	Mesure	Atténuation (Kteq CO_2)	Coût (M MAD) (10 MAD ≈ 1$)
Mesures inconditionnelles	Programme de la généralisation des lampes LED dans le secteur résidentiel à l'horizon 2030.	11005.70	14680
	Norme Minimale de Performance Énergétique des réfrigérateurs.	4818.80	6480.40
	Norme Minimale de Performance Énergétique des climatiseurs.	1813.20	2960.80
	Efficacité énergétique pour les enveloppes des nouveaux bâtiments.	499.80	800
	Efficacité énergétique dans les établissements d'hébergement touristique.	280.80	440.60
	Total	**18418.30**	**25370.80**
Mesures conditionnelle	Plan national de développement des chauffe-eau solaires de 2020 à 2030.	647.50	910.30
	Installations de PV de 1000 MWc à l'horizon 2030 pour l'autoconsommation dans le secteur du bâtiment.	4472	9420.20
	Total	**5119.50**	**10330.50**

Les actions d'atténuation regroupent principalement l'efficacité énergétique liée directement avec les objectifs de réduction des gaz à effet de serre notamment sur la production de l'eau chaude sanitaire solaire, la performance de l'enveloppe, les électroménagers efficaces et l'autoproduction d'électricité sur les toits des bâtiments. Cela en parallèle avec la stratégie nationale de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment.

2.3.4. Acteurs de la construction durable au Maroc

Pour la mise en œuvre, les stratégies nationales dans le secteur du bâtiment, plusieurs acteurs gouvernementaux ou non gouvernementaux se sont mobilisés pour développer et encourager le recours à la construction durable pour la transition vers une croissance verte. Parmi ces acteurs dans le secteur du bâtiment (Tableau 8), on peut citer :

Tableau 8: Acteurs dans le domaine des bâtiments verts au Maroc (Source : Auteur,2023)

Organisation	Missions et le rôle
Agence marocaine d'efficacité énergétique (AMEE)	Agence publique créée en 2010 dans le cadre de la politique nationale d'efficacité énergétique et la transition décarbonée, dans les secteurs d'activité économique (bâtiment, transport, industrie, …).
Cluster EMC	Le cluster efficacité énergétique des matériaux de construction est une association à but non lucratif crée fin 2013, ce cluster a pour objectifs : - Favoriser l'amélioration de la compétitivité de l'industrie des matériaux de construction ; - Encourager la collaboration entre les acteurs de l'industrie, les chercheurs et les organismes de formation.
L'AMCCD	L'Alliance Marocaine pour le Climat et le Développement Durable créés en 2015 s'intéressent aux domaines de développement durable et de changement climatique.
Le ministère de l'Aménagement du Territoire National, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Politique de la Ville	Le MATNUHPV est chargé de la préparation et l'exécution de la politique du gouvernement dans les domaines de l'aménagement du territoire et de l'habitat. Il contribue également, par les agences urbaines dans chaque ville de délibérer et contrôler le respect de la réglementation dans la construction des bâtiments.
Construction 21-Maroc	C'est une plateforme qui offre aux professionnels marocains un espace d'échange d'information en termes de construction durable, mais aussi au niveau international.
IMANOR	L'Institut Marocain de Normalisation (IMANOR), établi en 2010 selon la loi N° 12.06, joue un rôle essentiel dans l'évaluation et l'approbation de la qualité des équipements et des matériaux de construction. Il est important de noter que les normes marocaines ou internationales applicables au Maroc doivent être intégrées dans les spécifications des marchés. La conformité du produit est confirmée par la délivrance d'un certificat NM.
MGBC	Le Conseil marocain du bâtiment vert (MGBC) a établi en 2016 à l'occasion de la COP22, qui est un membre dans le réseau de Green Building Council (WGBC) qui est une organisation à but non lucratif ; il s'est engagé à limiter la hausse de la température mondiale à 2 degrés Celsius ; Réduire les émissions de CO_2 du secteur du bâtiment et de la construction de 84 gigatonnes et garantir que tous les bâtiments sont à zéro émission nette d'ici à 2050 [24]. En 2020, le conseil de MGBC n'est pas renouvelé.

Dans cette optique, il est impératif pour le législateur d'établir des normes juridiques pour encadrer ces acteurs et intégrer les engagements nationaux et internationaux du Maroc dans le secteur du bâtiment. De ce fait, il est essentiel d'examiner attentivement le cadre juridique mis en place.

2.3.5. Réglementation nationale

Depuis les années d'indépendance, le Maroc a commencé à encadrer le secteur du bâtiment par un cadre réglementaire. Ministère de l'Energie et des Mines, de l'Eau et du Développement Durable et le ministère de l'Aménagement du Territoire National, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Politique de la Ville présente dans son portail une revue exhaustive de l'arsenal juridique national sous forme des lois, Dahirs, décrets, arrêtés et circulaires. En parallèle, un travail de normalisation par l'Institut

marocain de normalisation (IMANOR) propose à son tour un ensemble de normes en relation avec l'industrie du bâtiment. La figure suivante résume la répartition de la réglementation en relation avec la construction :

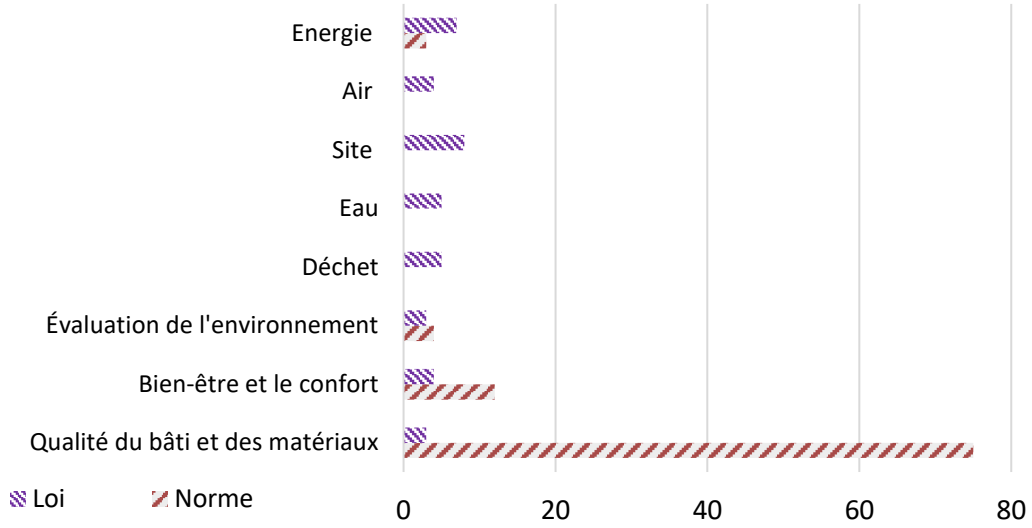


Figure 24: Nombre de lois et de normes par catégorie au Maroc (Fin 2022) (Source : Auteur,2023[93])

Le Maroc a enregistré des avancées concrètes dans l'encadrement du secteur par une série de textes juridiques fondamentaux, notamment : le « Règlement parasismique « RPS 2000 », la règlementation thermique dans le bâtiment (RTCM), loi 10-03 (12 mai 2003) sur les accessibilités architecturales et environ 150 normes reformulées ou adaptées à partir de la bibliographie de l'organisation internationale de normalisation ISO ou Européenne (CEN) par l'Institut Marocain de Normalisation. De tout cela, nous pouvons constater qu'il y a un équilibre entre les lois et les normes promulguées relatives à la construction durable. Bien que quelques lois existent depuis les années 1980, les normes ont été créées récemment et se mettent à jour chaque année par l'IMANOR. Les spécifications techniques des matériaux de construction et la qualité des ouvrages s'avèrent l'orientation la plus dominante des normes (76/100 normes) qui caractérisent les matériaux de la structure, d'isolation et les produits de finition. Plus de 20 % des lois sont orientées confort et bienêtre des occupants. Les lois qui portent sur l'énergie restent encore embryonnaires et ne traitent pas les systèmes énergétiques tels que HVAC (Heating, ventilation, and air conditioning). Dans ce cas, les concepteurs marocains ont recouru plutôt à l'utilisation des normes internationales (ASHRAE, EN et NF). Dans le secteur d'efficacité d'énergie, le Maroc a développé une nouvelle stratégie énergétique par l'adoption de la loi 47-09 (29 Septembre 2011), qui vise à réaliser une économie d'environ 20 % de la consommation d'énergie d'ici à 2030 [94]. Dans cette perspective, l'AMEE a mis en place une réglementation thermique des bâtiments en 2014, qui passe par l'intégration des exigences minimales que doivent respecter les concepteurs et réalisateurs des bâtiments résidentiels et tertiaires avec un label Eco-Binayate qui n'est pas encore publié ou appliqué. Également, le décret N° 2-17-746 du 10 avril 2019

exige un audit énergétique, pour les bâtiments qui ont une consommation totale finale plus de 500 Tep/an. Concernant le développement des filières d'énergie renouvelable et encourager les initiatives privées notamment sur les toits des bâtiments, le législateur marocain a adopté la loi n° 82.21 (20 décembre 2022) relative à l'« Autoproduction d'électricité au Maroc ». Le tableau 9 résume les principales lois relatives aux bâtiments.

Tableau 9 : Synthèse de la réglementation nationale en relation avec la thématique « Bâtiments verts » (Source : Auteur,2023)

Domaine/ catégorie	Loi/décret
Efficacité énergétique	La loi n° 47.09 (29 septembre 2011) d'efficacité énergétique.
	La loi n° 13-09 (11 février 2011) relative aux énergies renouvelables.
	La loi n° 82.21(20 décembre 2022) relative à l'autoproduction d'énergie électrique.
Matériaux et déchets	La loi n° 12-06 (11 février 2010) relative à la normalisation, à la certification et à l'accréditation (IMANOR).
	La loi n° 28.00 (7 décembre 2006) et Décret n° 2-14-85- 2015 relative à la gestion des déchets solides.
Eau	L'article 47 de la loi n° 11-03 du 12 mai 2003 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement.
	La loi n° 36-15 sur l'eau (10 août 2016).
Site (terrain)	La loi n° 11-03 (12 mai 2003) relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement.
	La loi n° 12-03 (12 mai 2003) relative aux études d'impact sur l'environnement.
	La loi n° 49-17 (8 août 2020) relative à l'évaluation environnementale.
	La loi n ° 12-90 relative à l'urbanisme (17 juin 1992).
	La Loi n° 25 – 90 relative aux lotissements, groupes d'habitations et morcellements ((17 juin 1992).
Qualité de l'environnement intérieur	Les deux articles 47 et 48 de la loi n° 11-03 du 12 mai 2003 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement.
	La loi n° 13.03 (12 mai 2003) relative à la lutte contre la pollution de l'air.

En termes de gestion des déchets et le contrôle de la qualité des matériaux de construction, la conformité technique des matériaux de construction doit être attestée par l'obtention d'un certificat et l'apposition de la marque de conformité du produit aux normes marocaines sur le produit certifié ou sur son emballage, à savoir la marque NM. Cela garantit la conformité aux normes de qualité établies et assure un contrôle adéquat de la qualité des matériaux utilisés. En 2020, IMANOR a publié un guide normatif d'écoconstruction destiné aux bâtiments de nouvelles constructions ou en cours de rénovation ou réhabilitation (plus de détails [95]). À la lecture du guide normatif ([95]) de l'IMANOR et de la loi 28.00 (7 décembre 2006) relative à la gestion des déchets solides, on s'aperçoit que le législateur n'a pas exigé un mode spécifique aux gestions des déchets de construction et de démolition, et l'absence d'obligation de l'étiquetage environnemental des matériaux de construction. Concernant

la réglementation pour la catégorie de l'eau en relation avec l'industrie du bâtiment, l'article 47 de la loi n° 11-03 du 12 mai 2003 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement, il est strictement interdit de procéder à tout déversement illégal de substances dangereuses dans l'eau. Cette disposition vise à prévenir toute contamination et détérioration de la qualité de l'eau. En outre, le maître d'ouvrage est tenu de mettre en place toutes les mesures nécessaires pour garantir la protection de la qualité de l'eau sur le chantier. La récupération des eaux pluviales est une stratégie à mettre en place à l'échelle du bâtiment, elle permet d'économiser l'eau pour certains usages intérieurs et extérieurs selon des conditions techniques et sanitaires. La nouvelle loi 36-15 (10 août 2016) sur l'eau a éclairé le régime juridique des eaux pluviales, selon l'article 62 du chapitre IV, « Les propriétaires et les exploitants ont le droit de collecter, de stocker et d'utiliser des eaux pluviales tombées sur leurs fonds », alors que les agences de bassin hydraulique peuvent assister financièrement et techniquement.

Le choix d'un site (parcelle) doit contribuer à protéger la biodiversité locale et minimiser la pollution, comme il a été mentionné dans la première section du chapitre III de la loi n° 11-03 (12 mai 2003) et qu'il fallait protéger le sol et sous-sol contre toutes formes de dégradation et de pollution, quelle qu'en soit l'origine. Toute utilisation du terrain exige une autorisation préalable. Il convient de noter que les projets de construction de bâtiments tertiaires tels que les complexes touristiques doivent être soumis à une étude d'impact environnemental conformément à la loi n° 12.03 du 12 mai 2003. De plus, ces projets doivent être accompagnés d'une étude d'impact énergétique et d'un plan de surveillance environnementale, conformément au décret d'application de la loi 49-17 du 8 août 2020 relative à l'évaluation environnementale.

En matière de qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment, les articles 6, 7,30, 32, 43 et 44 de la loi n° 13.03 (12 mai 2003) relatifs à la lutte contre la pollution de l'air, exigent d'aération ou ventilation nécessaire pour les bâtiments tertiaires sans préciser les minimas. Au niveau du confort acoustique, l'article 47 et 48 de la loi N° 11-03 du 12 mai 2003 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement, interdit toute nature de bruit et vibrations sonores, susceptibles de causer une gêne pour le voisinage, de nuire à la santé de l'homme ou de porter atteinte à l'environnement en général.

Cependant, on observe que la réglementation nationale en relation avec le bâtiment manque d'efficacité technique pour parvenir à une industrie du bâtiment vert et des décrets d'application. Comme indiqué dans le tableau 9, la catégorie des déchets (loi 28.00, 7 décembre 2006) se concentre sur la gestion des déchets ménagers et la classification des déchets, mais elle ignore les pratiques de valorisation des déchets de construction afin d'améliorer le taux d'insertion des matériaux de construction secondaire reçus par les filières de valorisation des déchets de construction. De plus, le règlement thermique de construction marocaine (RTCM) a été appliqué que dans quelques projets malgré qu'il soit été approuvé depuis 2015. Selon l'étude de M'lahfi et *al*. (2020)[96] que parmi les

73.50 % qui connaître la RTCM juste 34.90 % qui l'applique, ce qui pose la question le niveau d'exigence et d'application de ce règlement en absence des sanctions. Plusieurs chercheurs ([97][98]) recommandent des révisions au niveau des exigences en termes d'obligations d'isolation des toitures et d'intégrer d'autres paramètres : tels que les ponts thermiques, le renouvellement d'air, les infiltrations d'air et le coefficient d'absorption solaire de la toiture. Ainsi, la loi 82.11 (20 décembre 2022) sur l'autoproduction d'électricité par les panneaux photovoltaïques sur les toits des bâtiments, elle limite le taux d'injection à 20 % de surproduction dans le réseau public selon l'article N° 12. Cela n'encourage pas les particuliers à investir pour la production d'énergies renouvelables à l'échelle du bâtiment.

Bien qu'il existe de nombreux défis règlementaires reconnus aux pays en développement notamment à l'application des textes réglementaires, plusieurs chercheurs, dont Windapo *et al*. (2015)[99] pour l'Afrique du Sud, ont déclaré que le défi de l'application de la réglementation a la nécessité d'améliorer radicalement la capacité des institutions gouvernementales à jouer un rôle actif dans l'élaboration et la mise en œuvre de politiques et de législations qui encouragent le développement durable dans le secteur du bâtiment. Omopariola *et al.* (2022)[100] soutient qu'il est toujours nécessaire que les autorités chargées de la construction des bâtiments et les autres acteurs publics s'impliquent davantage. Donc, le concept de construction durable pourrait être plus réussi si les parties prenantes, y compris le gouvernement marocain, mettaient en place une législation qui nécessite la collaboration et la coopération des acteurs de l'industrie du bâtiment.

2.3.6. Enseignement et la formation professionnelle

Au niveau de l'intérêt de l'enseignement et la formation professionnelle au développement des GB, selon M'lahfi *et al.* (2020)[96], le volet de la formation occupe le pourcentage majoritaire de 41.30 %, suivi de 31.30 % des réponses en faveur des visites d'experts et de la sensibilisation et enfin 27.50 % des avis pour la communication via des séminaires et congrès afin de vulgariser les exigences du RTCM pour faciliter leur application. Il est donc important d'examiner les formations universitaires de la thématique « Bâtiment vert » au Maroc. Cette évaluation reflétera non seulement les lacunes de l'enseignement de la construction durable dans les établissements d'enseignement supérieur, mais soulignera l'importance de la formation dans le déploiement de la construction durable.

A la fin de l'année 2022, il n'y a aucune formation spécialisée disponible dans une université étatique qui offre une formation initiale dans les bâtiments verts/bâtiments durables. Les programmes des licences professionnelles et techniques, le cycle du master et le cycle d'ingénieur dans le réseau des universités marocaines se concentrent sur l'efficacité énergétique dans le secteur industriel et les bâtiments. L'université Mohammed VI Polytechnique offre la formation de master « Ingénierie des Bâtiments Verts et Efficacité Energétique » et le master « SUArch Architecture durable et villes intelligentes » par l'Université Internationale de Rabat, offrant une formation interdisciplinaire dans le

domaine des bâtiments verts avec des modules différents en énergie, bioclimatique et les systèmes de certification des bâtiments (Annexe F). Le réseau des écoles nationales d'architecture offre des bases solides en termes d'écoconception. Certaines universités offrent des formations d'ingénieurs et des masters spécialisés en relation avec l'efficacité énergétique, mais toujours l'intérêt est orienté vers l'énergie, alors que la connaissance et la compétence en matière du bâtiment vert (« Green building knowledge and skills ») se basent sur différents aspects en relation avec le développement durable. De même, le réseau d'office de la formation professionnelle et de la promotion du travail offre des formations techniques (Bac professionnel et technicien spécialisé) dans les métiers du bâtiment (dessin et gros œuvre), telles que la formation responsable qualité, sécurité et environnement à LAAYOUNE, l'Institut Spécialisé des Matériaux de Construction (IMC) à Tamesna, et l'Institut de Formation aux Métiers des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (Oujda/Tanger/ Ouarzazate). Néanmoins, ces formations se concentrent sur l'efficacité énergétique. Au-delà de la consommation d'énergie, le bâti a un impact environnemental potentiellement considérable, en termes de consommation des ressources naturelles, de la production des déchets et prend en compte la santé et le confort de ses usagers. L'experte Laura B. Cole (2019)[101] dans le domaine de l'éducation et la construction durable que le savoir et les compétences doivent être en relation avec les principaux thèmes suivants : la durabilité du site, transport, eau, matériaux et gestion des déchets, analyse du cycle de vie, analyse des coûts et le confort des occupants. Laura B. Cole a proposé d'intégrer les thématiques liées aux bâtiments verts dans le programme scolaire commençant de l'école primaire dans un projet « Green Building Literacy » qui s'inscrit dans le mouvement plus large pour l'éducation et l'environnement.

2.4. Déploiement de la certification verte dans le secteur du bâtiment

La certification « Bâtiments vert » joue un rôle important dans le déploiement d'une politique durable dans le secteur du bâtiment, alors après le premier bâtiment certifié datant de 2014, les GB certifiés sont désormais développés dans les grandes villes économiques du Maroc, principalement dans les deux villes métropolitaines Casablanca et Rabat. La figure 25 présente le nombre total de projets GB, principalement pendant la phase de conception et construction. De 2014 à la fin de l'année 2022, il n'y a eu que 74 projets certifiés. Un certain exemple de projet des bâtiments verts est illustré en annexe (G). Les statistiques démontrent une tendance vers les référentiels internationaux. En 2018, il y avait 10 projets GB certifiés avec les deux systèmes internationaux HQE et LEED. À la fin de 2022, 26 projets de construction résidentielle et tertiaire avaient été certifiés bâtiments verts. Comme on peut le voir sur la figure 25, les bâtiments certifiés ont augmenté de 2015 à 2020 sauf l'année 2019. Le nombre et la surface de bâtiments verts en 2022 étaient approximativement égaux à la somme de deux années précédentes (2020-2021). À la fin de 2022, la surface totale des bâtiments verts était de plus de 185000 de mètres carrés.

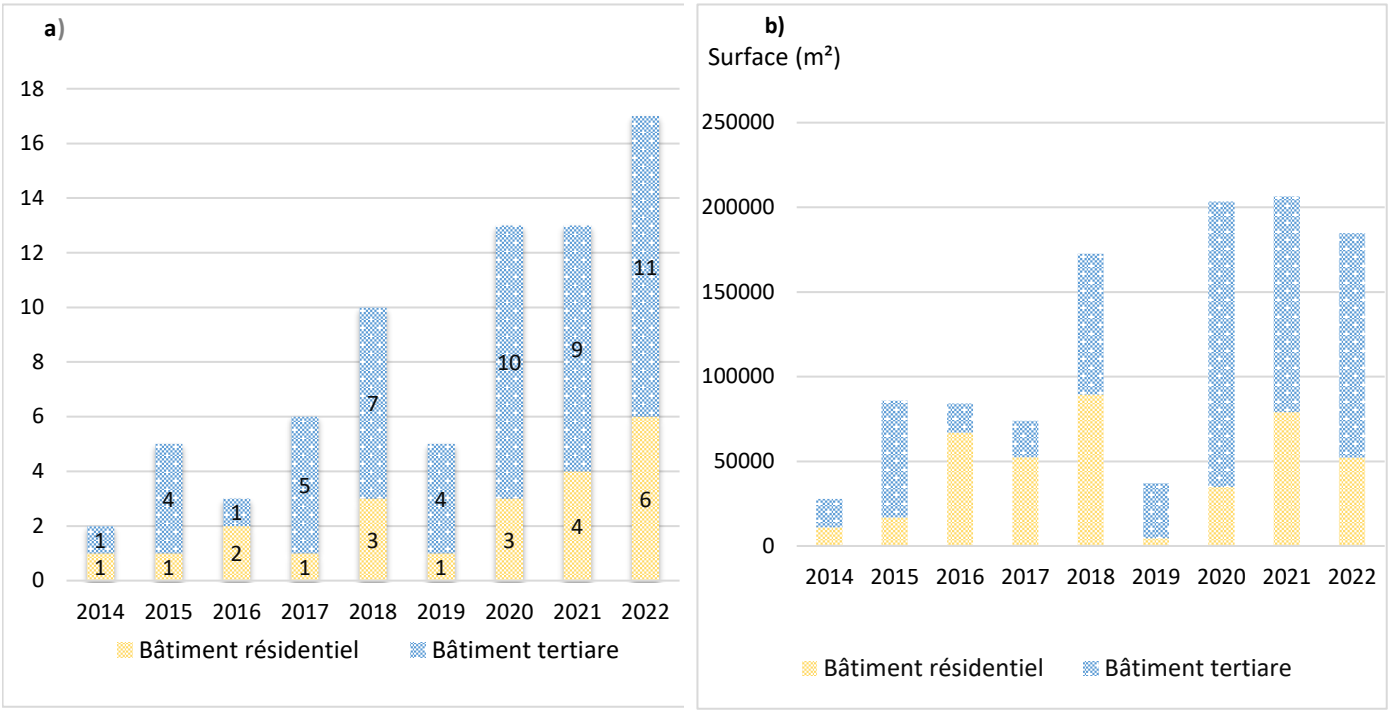


Figure 25: Projets certifiés selon type du bâtiment (2014-2022), a) selon le nombre et b) selon la surface totale certifiée (Source : Auteur,2022 [93])

La prédominance de la surface totale des bâtiments résidentiels certifiés est évidente dans la Figure 25 pendant les deux années (2017-2018), ils contiennent plusieurs immeubles multifamiliaux (logements collectifs) ou des villas ainsi des logements de vacances dans la région Taghazout-Agadir. Cependant, le nombre de ces projets reste encore très minoritaire par rapport au nombre de projets résidentiels qui sont en cours de construction. Cependant, les autres années les bâtiments tertiaires ont été certifiés plus que les bâtiments résidentiels, avec 42 % des immeubles de bureaux, 26 % des hôtels, 18 % des établissements d'enseignement et 14 % des commerces et des établissements de santé. Les proportions de cas certifiés en HQE et LEED sont respectivement de 88 % et 11 %, ce qui rejoint les réponses à la question de l'enquête (Questionnaire A) sur le type de système certification utilisé par les participants dans leurs projets, alors que 43.50 % ont utilisé HQE, 20 % des répondants ont appliqué LEED. Enfin, 10 % participants ont choisi le système britannique BREEAM (dont 16 participants ont utilisé les trois systèmes à la fois).

Le référentiel français HQE était toujours le plus largement utilisé au Maroc, expliqué par la facilité d'accès : en premier lieu la langue française de ce système encourage les professionnels à s'intéresser plus à ce système, alors que BREEAM et LEED utilisent l'anglais pour leurs manuels techniques et leurs processus de documentation. Il est essentiel que le référentiel de certification et/ou ses évaluateurs disponibles s'intègrent à cette langue qui facilite d'intégrer le système HQE dans le marché marocain. D'autre part, l'accès à des référents d'accompagnement est vital pour accompagner l'équipe de projet à se préparer à la phase de certification. Le système HQE a plus de quarante référents accrédités au

Maroc, un nombre qui peut être considéré comme acceptable, les référents de LEED sont moins disponibles que HQE avec 23 LEED-AP, alors que BREEAM n'a qu'un seul référent.

Après la procédure d'évaluation, les bâtiments reçoivent des certificats avec des niveaux, 43 projets certifiés par HQE au-delà de « Très bon » parmi les 65 projets certifiés, ainsi que trois projets verts certifiés par le système LEED-or (Tableau 10). 14 villes ont des bâtiments verts certifiés, comme démontré par la figure 26.

Tableau 10: Projets certifiés selon le niveau de la performance (Source : Auteur,2022 [93])

HQE		**LEED**		**BREEAM**	
Exceptionnel	19	Platine	-	Exceptionnel	-
Excellent	24	Or	3	Excellent	-
Très bon	20	Agent	2	Très bon	-
Bon	2	Certifié	3	Bon	-
Passe	-			Passe	1

La plupart de ces projets s'installent sur l'axe Casablanca-Rabat qui occupe la première place en termes de surface et de nombre de projets, ce qui signifie que les provinces qui ont une plus grande échelle de construction ont tendance à avoir un plus grand nombre de bâtiments verts. Salé classée en deuxième en termes de la surface due au projet de la tour Mohammed VI et Agadir en troisième par des projets touristiques dans le cadre du plan national AZUR pour le développement du secteur touristique. Selon le nombre des projets certifiés, Rabat est classé en deuxième position après Casablanca (Figure 26).

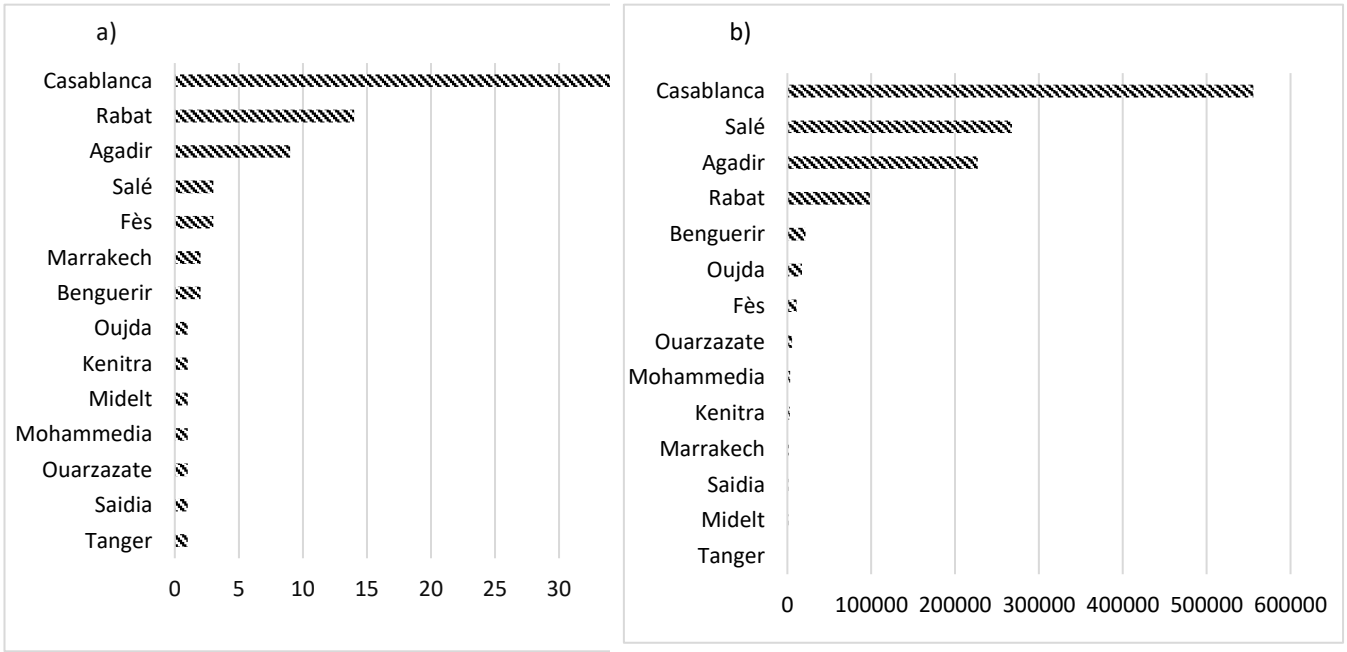


Figure 26 : Classement des villes selon le nombre et la surface des projets certifiés (2014-2022), a) : nombre des projet et b) selon la surface (Source : Auteur,2022 [93])

La répartition des bâtiments verts est évidemment irrégulière entre les régions marocaines. Les données sur le PIB régional sont utilisées pour déterminer si les régions ou les villes ayant un PIB plus élevé ont tendance à avoir plus de bâtiments verts. La figure 27 montre l'analyse de régression entre les données du PIB et les bâtiments verts certifiés. Les deux variables nombre et de surface des bâtiments verts sont significativement forts ($R^2 > 0.75$) liées au PIB de la région. Ces relations à travers des analyses de régression linéaire montrent que les régions ou les villes avec un PIB plus élevé (activité économique) ont tendance à avoir plus des bâtiments verts certifiés.

Lors d'un entretien avec Mr. Fahd AOUNI, responsable de certificateur Certivéa de HQE au Maroc, nous a déclaré : « parce qu'on a la majorité des sièges et des bureaux qui sont installés déjà à l'axe économique Rabat-Casablanca, et plus de 75 % des certifications Certivéa sont des bureaux, c'est pourquoi la certification HQE est importante sur cet axe ».

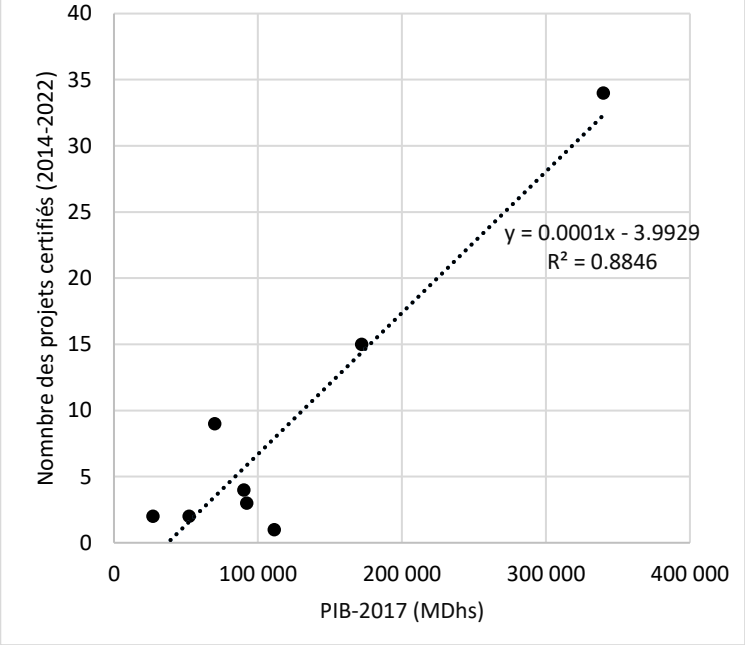


Figure 27: Régression linéaire entre le PIB et le nombre Des bâtiments certifiés pour les 8 régions ([93]).

2.5. Résumé

Le concept des bâtiments verts au Maroc en est encore à ses débuts. Comme l'ont confirmé 44 % des participants au questionnaire (A) et le nombre des bâtiments certifiés par les référentiels internationaux, qui montrent l'émergence de la notion du « Bâtiment vert » dans le secteur du bâtiment au Maroc. En comparaison avec les pays en développement, le Maroc reste l'un des pays les plus engagés contre le changement climatique et pour la transition énergétique dans le secteur du bâtiment, par des projets de NAMA-Habitat. Par ailleurs, le Maroc a établi un cadre juridique qui encadre le secteur du bâtiment à travers une série des lois fondamentales concernant en particulier le sismique, la thermique et l'accessibilité. Néanmoins, des défis d'applicabilité se posent en raison de l'absence de décrets d'application spécifiques à chaque secteur. Une solution à cet obstacle pourrait consister en l'élaboration d'un code national « Bâtiment vert » ou d'un référentiel d'évaluation des bâtiments verts.

Bien que l'adoption des bâtiments verts offre de nombreux avantages en matière de durabilité qui motivent l'adoption des GB au Maroc, celle-ci est toujours entravée par un certain nombre d'obstacles. Il est nécessaire de comprendre ces obstacles et les moteurs à l'adoption des GB.

CHAPITRE 3 : Obstacles et moteurs de développement des bâtiments verts avec une étude comparative.

3.1. Introduction

Ce chapitre s'appuie sur les deux chapitres précédents en expliquant les obstacles qui freinent le déploiement des GB au Maroc et les moteurs qui peuvent les surmonter. Un certain nombre d'études ont été menées pour analyser les barrières (e.g. Tokbolat *et al.* (2020)[102] et Karji *et al.* (2020)[103]) et divers moteurs (e.g., Darko *et al.* (2017)[104] ; Oke *et al.* (2019)[105] et Durdyev *et al*. (2022)[106]). Ces études reflètent les spécificités du contexte de chaque étude et les priorités propres à chaque pays ou région, qui sont censées influencer les décisions des parties prenantes sur la mise en œuvre des pratiques de la durabilité. Cela suggère que les paradigmes de développement d'une politique durable dans le secteur du bâtiment ne soient pas les mêmes à travers le monde. Toutefois, à notre connaissance, les recherches concernant les obstacles et les moteurs de l'adoption des GB au Maroc se sont avérées insuffisantes ou inexistantes jusqu'à maintenant.

Nous avons procédé d'abord à une revue de la littérature sur les obstacles et les moteurs dans deux contextes distincts : les pays en voie de développement et ceux développés. Grace à cette analyse, nous avons pu établir une liste des obstacles et des moteurs essentiels à l'élaboration du questionnaire d'enquête impliquant 167 participants au Maroc. Nous avons ensuite comparé les résultats avec des études menées dans la région MENA ainsi qu'avec celles de pays avancés dans le développement des GB.

3.2. Méthodologie de l'enquête

L'étude a adopté une méthodologie de recherche quantitative par le biais des enquêtes empiriques par questionnaire pour obtenir les données nécessaires à l'étude. De plus, les éléments du questionnaire (A) ont été recueillis via les données de la littérature sur les obstacles et les moteurs de développement des bâtiments dans des contextes des pays développés et en développement, le tableau 11 présente les obstacles et les moteurs choisis pour la présente étude.

Tableau 11: Liste des obstacles et les moteurs sélectionnés pour le questionnaire (Source : Auteur,2022)

Obstacles Références : [80][84]–[91]	**Moteurs** Références : [102][104][105][113][115]–[120]
B1. Manque d'expertise et de la formation professionnelle	M1. Demande du client
B2. Manque de soutien du gouvernement	M2. Augmentation de la prise en conscience
B3. Contrainte de la disponibilité des matériaux écologiques	M3. Réglementation complète du GB
B4. Coût d'investissement élevé de la construction écologique.	M4. Support l'économie nationale
B5. Manque d'intérêt exprimé par les clients et la demande du marché	M5. Etablir un système d'évaluation de la durabilité des bâtiments

(Continue)	
B6. Absence des codes et réglementations GB	M6. Réduction des taxes
B7. Complexité du projet	M7. Responsabilité sociale des entreprises
B8. Risques élevés associés à l'investissement	M8. Augmentation la valeur du bâtiment
B9. Résistance au changement des parties prenantes	M9. Préservation des ressources naturelles
B10. Attitudes, culture, mode de vie et comportements	M10. Améliorer la santé et le confort des occupants
B11. Manque de la conception intégrée pour la gestion du cycle de vie	M11. Incitation financière et non financière
B12. Technologies de construction verte non disponibles	M12. Réduire les impacts environnementaux
	M13. Innovation dans les technologies vertes
	M14. Bonne image des entreprises
	M15. Réduction des coûts du cycle de vie
	M16. Augmentation de la recherche et de la formation

Les répondants au questionnaire sont des professionnels ayant une bonne connaissance de la thématique bâtiment vert. Au total, 167 réponses à l'enquête ont été reçues et les données ont été analysées en détail dans la section suivante. Il a été difficile de déterminer le taux de retour du questionnaire, car une technique d'échantillonnage en boule de neige a été utilisée, en nous basant sur le nombre d'accès au lien du questionnaire. L'enquête par questionnaire (A) de l'annexe (H) a recueilli des informations générales sur les répondants et leur a demandé d'évaluer l'importance des facteurs sur une échelle de Likert à 5 points.

3.2.1. Forme du questionnaire

Le questionnaire a structuré les parties dans une logique d'entonnoir, en allant du général au spécifique, la première partie contient des questions sur la situation des bâtiments verts. Dans la deuxième partie, nous demandons aux participants de noter la criticité des obstacles les plus importants à l'adoption du GB en utilisant une échelle de Likert à cinq points allant de 1 : pas critique à 5 : très critique dans le secteur de la construction au Maroc. De la même manière, les participants ont classe le niveau d'importance des 16 moteurs pour surmonter ces obstacles, pour conclure avec le profilage des participants.

3.2.2. Étude pilote

Après la préparation de l'enquête, trois experts (deux consultants en GB et un universitaire) ayant au moins cinq ans d'expérience ont été interrogés dans le cadre d'une étude pilote. L'objectif de l'étude pilote était de vérifier l'exhaustivité et la pertinence de l'enquête. Le feedback de l'étude pilote a été utilisé pour affiner le questionnaire.

3.2.3. Administration de l'enquête

Pour l'échantillonnage de l'enquête, des techniques d'échantillonnage par choix raisonné (y compris l'échantillonnage en boule de neige) ont été utilisées et les questionnaires ont été distribués aux praticiens dans le domaine de l'architecture, aux chefs de projet, aux ingénieurs, aux les référents des systèmes internationaux (HQE, LEED et BREEAM), aux universitaires, ainsi qu'aux membres du Conseil marocain du bâtiment vert (MGBC) ayant une expérience en thématiques du GB. Le Cluster Efficacité Energétique des Matériaux de Construction (EMC) et le Conseil National de l'Ordre des Architectes (CNOA) ont contribué à contacter les participants potentiels, ainsi que, le Comité d'organisation de forum Global green de 2021 et la Fédération nationale du Bâtiment et Travaux Publics (FNBTP). La situation sanitaire de l'épidémie COVID 19 nous a obligé à partager notre questionnaire (A) aux 310 participants par des invitations par émail pendant la période de début janvier et fin d'avril 2021.

3.2.4. Tests statistiques pour l'analyse des données

Les données recueillies ont été soumises à des statistiques descriptives et à une analyse de classement à l'aide du logiciel de statistiques SPSS V26 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA). Il s'agit notamment de l'indice de fiabilité alpha (α) de Cronbach ; le classement des scores moyens et l'écart-type. En parallèle avec la statistique descriptive, des tests non paramétriques utilisés sur des données qui ne suivent pas une distribution normale et le clustering hiérarchique.

- *Indice alpha (α) de Cronbach*

La fiabilité des données catégorisées a été calculée à l'aide de la méthode alpha de Cronbach. Les valeurs du coefficient alpha de Cronbach pour cette étude sont de 0.864 pour les barrières et 0.902 pour les moteurs de développement des GB. Comme ces valeurs de test sont supérieures au seuil de 0.70, cela signifie que les données de cette étude utilisant l'échelle de Likert en cinq points sont fiables au niveau de signification de 5 % [121].

- *Technique d'analyse de classement*

La technique de classement par score moyen a été utilisée pour déterminer le classement relatif des barrières et des moteurs de développement des stratégies durables dans l'industrie du bâtiment. L'écart type a été utilisé pour attribuer un rang lorsque deux facteurs ou plus avaient le même score moyen.

- *Techniques d'analyse du consensus*

Le coefficient de concordance de Kendall (W de Kendall) est un test non paramétrique utilisé pour vérifier l'accord général entre un ensemble de classement [122]. En tant que tel, le test W de Kendall a été effectué pour vérifier si les différents répondants dans certains groupes étaient d'accord sur le classement des obstacles et des moteurs. L'hypothèse nulle du test W de Kendall est qu'"il n'y a pas d'accord entre les classements donnés par les répondants ». La valeur du W de Kendall varie de 0 à 1, où une valeur de 0 indique « Aucun accord » et 1 indique « Accord complet ». Si la valeur W de Kendall

générée par le test est à un niveau de signification faible (niveau de signification ≤ 0.05), alors l'hypothèse nulle peut être rejetée et la conclusion qu'un certain degré d'accord existe entre les répondants peut être tirée [122]. En plus du test du W de Kendall, les répondants étant issus de différentes professions (architectes, universitaires, consultants et cadres des services publics), il était important de vérifier si des différences significatives existent entre les quatre groupes de répondants de différentes entreprises. À cette fin, un test d'analyse de la variance (ANOVA) a été effectué. Une valeur p inférieure à 0.05 du test l'ANOVA montre que les opinions des répondants à l'enquête sur les obstacles et moteurs à la mise en œuvre du GB sont incohérentes pour l'intervalle de confiance retenu. Pour identifier les groupes qui ont influencé la cohérence des réponses dans notre échantillon, nous utilisons le test de Tukey post-hoc.

- *Technique de clustering hiérarchique*

L'analyse en clusters est une méthode permettant de combiner un groupe d'éléments de manière que les clusters se ressemblent les uns les autres. En appliquant le clustering hiérarchique des barrières et des moteurs en fonction de leur distance de cluster ; un dendrogramme sera obtenu, qui contient des clusters inclus.

3.3. Données démographiques des répondants

Cette section révèle des informations essentielles sur les 167 questionnaires complétés reçus (soit un taux de réponse de 55 %). Les profils des répondants sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Profils des répondants (Source : Auteur,2023 [69])

	Homme	Femme	Total
Par la profession (%)			
Architecte	10.18	14.37	24.55
Ingénieur	26.95	10.18	37.13
Chef de projet	3.59	0.00	3.59
Cadres	4.19	1.80	5.99
Référents (HQE, …)	5.39	3.59	8.98
Universitaires	12.57	4.79	17.37
Autres	1.80	0.60	2.40
Par la région (%)			
L'axe Rabat - Casablanca	40.72	26.35	67.07
L'axe (Tanger – Oujda)	7.78	4.19	11.98
Fès – Meknès	4.19	2.99	7.19
La région de sud	11.98	1.80	13.77
Spécialité des ingénieurs : Génie civil ; énergie, environnement et autres : urbaniste et QHSE			

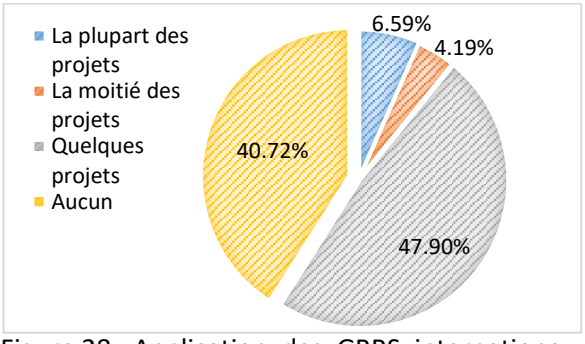


Figure 28: Application des GBRS internationaux par les participants à l'enquête

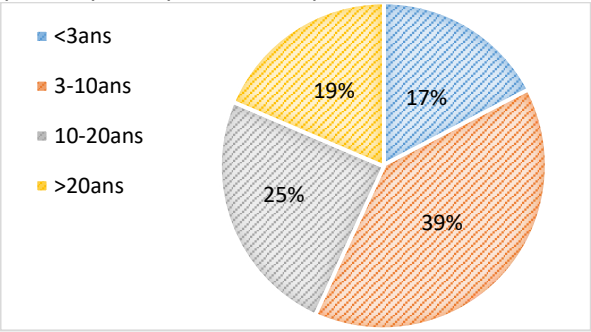


Figure 29: Nombre d'années d'expérience

D'un point de vue professionnel, une légère majorité des participants sont des ingénieurs de génie civil, d'efficacité énergétique et de génie environnement (62 réponses), 42 formulaires remplis ont été

reçus des architectes, 15 référents et 28 d'enseignants-chercheurs. 59 répondants étaient des femmes alors qu'elles ne représentaient que 14.50 % du secteur de BTP au Maroc [123]. Il est évident que le secteur du bâtiment est toujours un domaine essentiellement masculin. Du point de vue distribution régionale, 67 % des participants se trouvaient au l'axe Casablanca-Rabat.

En outre, les participants à l'enquête ont eu une expérience professionnelle considérable dans le secteur de construction, selon la figure 29, 64 % (107) des répondants ont au moins 10 ans d'expérience dans le secteur ; 39 % des répondants en avaient entre 3 et 10 ans ; alors que 17 % des répondants étaient des praticiens plus jeunes du secteur, avec moins de 3 ans d'expérience. Les données du questionnaire ont montré que 60 % des participants avaient contribué au moins à un projet (Figure 28). Cela indique que notre échantillon à un niveau acceptable de connaissance de la thématique de l'enquête.

3.4. Analyse de la hiérarchisation des obstacles de développement des bâtiments verts

3.4.1. Analyse descriptive des résultats

Le résumé des résultats de l'analyse de classement sur les obstacles à l'adoption des GB est présenté dans le tableau 13.

Tableau 13: Classement les obstacles à l'adoption des GB au Maroc (Source : Auteur,2023)

	Les répondants				**ANOVA**
	Moy	**SD**	**R**	**N**	
B1. Manque d'expertise et de la formation professionnelle	2.33	1.35	11	0.39	0.007*
B2. Manque de soutien du gouvernement	2.85	1.45	5	0.65	0.568
B3. Contrainte de la disponibilité des matériaux écologiques	1.53	1.00	12	0.00	0.440
B4. Coût d'investissement élevé de la construction écologique.	2.50	1.49	8	0.48	0.741
B5. Manque d'intérêt exprimé par les clients et la demande du marché	3.56	1.31	2	1	0.025*
B6. Absence des codes et réglementations GB	3.56	0.80	1	1	0.001*
B7. Complexité du projet	3.47	0.86	3	0.95	0.000*
B8. Risques élevés associés à l'investissement	2.77	0.91	6	0.61	0.001*
B9. Résistance au changement des parties prenantes	2.49	0.72	9	0.47	0.723
B10. Attitudes, culture, mode de vie et comportements	2.38	0.73	10	0.42	0.282
B11. Manque de la conception intégrée pour la gestion du cycle de vie	2.70	0.95	7	0.58	0.025*
B12. Technologies de construction verte non disponible	2.87	0.80	4	0.66	0.001*
Kendall's W Sig.	0.231 0.000				

Moy : Moyenne ; SD : Écart-type ; R : Rang ; N : Valeur normalisée = (moyenne - moyenne minimale) ÷ (moyenne maximale - moyenne minimale), * une différence significative entre les deux groupes sur la classification les obstacles (< 0.05) (Annexe I).

Les scores moyens de la criticité des obstacles varient de 1.53 à 3.56. Les obstacles, dont les valeurs normalisées supérieures à 0.50 sont identifiées comme des obstacles critiques au développement des GB au Maroc. Le tableau 13 indique que sept des 12 barrières initiales ont des valeurs normalisées supérieures à 0.50 et sont donc considérées comme des barrières critiques. Comme on pouvait s'y attendre, B6 « Absence de code et réglementation GB » était classée au premier rang avec le score moyen le plus élevé (Moyenne = 3.56 ; SD = 0.804), ce qui indique que la réglementation et la normalisation sont l'obstacle le plus critique qui freine l'adoption des GB sur le marché marocain de la construction. Le deuxième classé par les répondants était B5 « Manque d'intérêt exprimé par les clients et la demande du marché » confirme que le GB n'a pas attiré suffisamment d'attention de toutes les parties prenantes de l'industrie du bâtiment, suivi de B7 « Complexité du projet », comme le troisième obstacle avec une moyenne de 3.47 et B12 « Indisponibilité des technologies de la construction verte » comme le quatrième (Moyenne = 2.87) et B2 « Manque de soutien du gouvernement » a été classé comme le cinquième obstacle le plus critique (Moyenne = 2.84).

Les valeurs W de Kendall pour le classement des principales barrières étaient de 0.177 à 0.329 pour les quatre groupes formés selon les profils de profession avec un niveau de signification du W de Kendall inférieur à 0.05, ce qui indique qu'un degré significatif d'accord existe entre tous les répondants de chaque groupe (Annexe I). A dernière colonne de tableau 13, les valeurs de signification ANOVA de cinq barrières (B2, B3, B4, B9 et B10) étaient supérieure à 0.05, ce qui indique qu'il n'y avait pas de différence statistiquement significative dans les perceptions de la criticité de ces obstacles par les répondants de quatre groupes. Cependant, les autres barrières (B1, B5, B6, B7, B8, B11 et B12) présentent une différence significative (significance level < 0.05) entre le classement des obstacles de développement des GB par les quatre groupes. A titre exemple de l'annexe (I) : le groupe « Architectes » (G1) donne plus d'importance à l'obstacle B11 « Conception intégrée pour la gestion du cycle de vie de projet » par rapport aux autres barrières par opposition aux trois autres groupes (G2, G3 et G4) ; cette interprétation est confirmée par le test des étendues de Tukey qui indique une différence significative entre G1<>G2, G1<>G3 et G1<>G4. De même le groupe « Chercheurs » classe la formation initiale de bâtiment durable ou vert dans les écoles d'ingénieurs et d'architectes et l'expertise professionnelle parmi les cinq premiers obstacles.

3.4.2. Classification les principaux obstacles sur la base du clustering

L'étude a adopté une analyse en cluster pour réduire le nombre de facteurs d'obstacles à un ensemble relatif de variables en examinant les interrelations entre les 12 barrières. L'analyse « Classify » par le logiciel statistique SPSS V26 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA) est utilisée [124]. Les résultats d'analyse sont présentés dans un dendrogramme, comme le montre la Figure 30.

En se référant aux 11 premières barrières regroupant en 4 clusters au niveau de coupure 15, on peut voir que le cluster 1 contient la barrière B6 et B2, le groupe 2 comprend B1, B9 et B10, le groupe 3 contient B5, B8 et B11 et que le dernier cluster est composé de trois barrières B4, B7 et B12.

Pour faciliter la suite de la discussion, il est nécessaire de renommer les quatre clusters extraits en fonction des résultats d'analyse. Par conséquent, les quatre clusters des barrières peuvent être renommés comme suit :

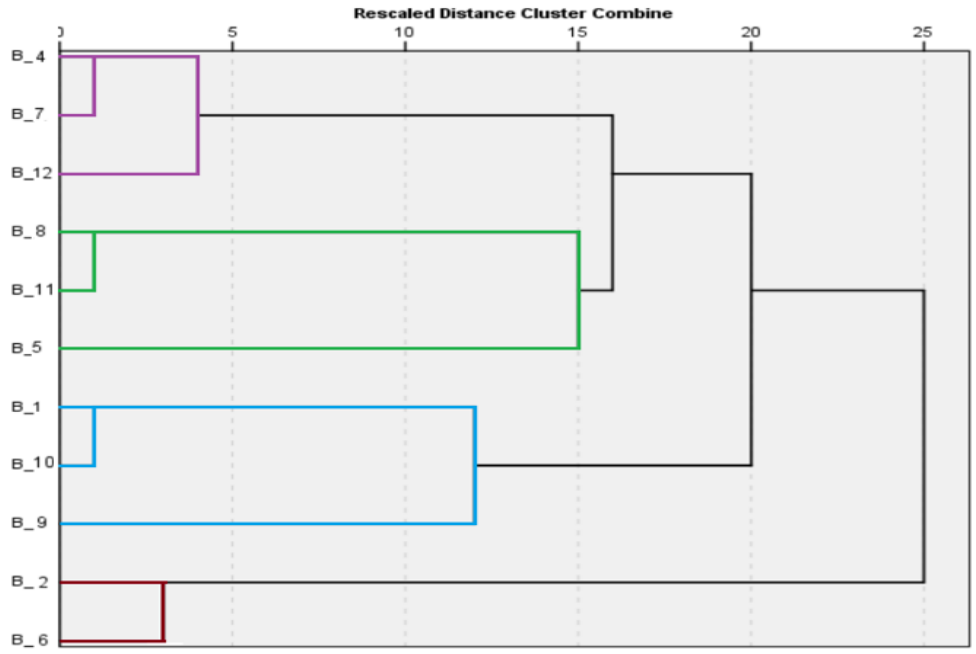


Figure 30. Résultats de l'analyse en clusters hiérarchiques les obstacles de développement des GB (Source : Auteur,2023 [69])

- Cluster 1 : « Obstacles liés au gouvernement » ; B6, B2

Ce cluster met en évidence les barrières liées au gouvernement dans la promotion de l'adoption des GB au Maroc, il est représenté par deux obstacles critiques : B2« Manque de soutien du gouvernement » et B6« Absence de code et réglementation GB ».

En fait, le rôle du gouvernement est essentiel pour l'adoption et la promotion des GB, cela particulièrement dans les pays en développement où le déploiement des GB en est encore à ses débuts. Dans ces pays, le gouvernement doit jouer un rôle plus proactif dans la promotion de l'adoption des GB en prenant diverses mesures pertinentes, dont l'une consiste à fournir des incitations, à la fois financières et non financières, pour stimuler l'adoption des GB, car elles aident en offrant une compensation pour le surcoût. Ainsi, le manque des mécanismes de financement pourrait expliquer pourquoi les coûts plus élevés des GB ont été classés parmi les cinq principaux obstacles. Les projets de démonstration financés par le gouvernement peuvent être nécessaires pour accélérer l'adoption de nouveaux GB et tester les performances des GB dans un contexte local [125]. Comme démontré dans le chapitre 2, le Maroc a enregistré des avancées concrètes dans l'encadrement du

secteur de construction par une série de textes règlementaires fondamentaux. Les stratégies et la réglementation sont des instruments importants pour promouvoir l'adoption des GB. Cela implique que le gouvernement marocain devrait assumer un rôle plus actif dans la poursuite de la mise en œuvre de la durabilité dans l'industrie du bâtiment en élaborant des politiques, des réglementations promouvoir l'adoption des GB et des mécanismes indépendants de veille sur l'application.

- Cluster 2 : Obstacles « Sociaux et de sensibilisation », B1, B9 et B10

Ce groupe se compose de trois barrières critiques : B1« Expertise et de formation professionnelle », B9« Résistance au changement des parties prenantes » et B10« Attitudes, culture, mode de vie et comportements ». Ces obstacles sont étroitement liés aux connaissances, à l'information et au comportement des clients et des parties prenantes.

La mise en œuvre des projets du bâtiment durable diffère de celle des projets de construction conventionnels non seulement en termes de processus, de conception et de matériau, mais également des technologies écologiques vertes (GBT) impliquées. L'utilisation des GBT est un élément clé de la mise en œuvre de projets de construction écologique. Par conséquent, un manque de formation du personnel intervenant dans les projets GB soit pendant la phase de conception et de construction peut avoir un impact négatif sur la mise en œuvre réussie des projets des bâtiments verts. Cela est encore plus nécessaire dans l'adoption des GBT, car les parties prenantes pendant la phase de conception et de construction doivent être qualifiées pour gérer efficacement tous les aspects technologiques, de gestion et techniques. D'autre part, l'absence des professionnels possédant les compétences, l'expertise et les connaissances nécessaires rendrait difficile pour une organisation l'adoption des GBT. Un autre obstacle en termes de recherche scientifique, est en relation avec le manque d'instituts et les laboratoires locaux pour la Recherche et développement (R&D) des GB. S. Yih et B.Li (2018)[126] ont souligné l'importance de la (R&D) pour le transfert de technologie écologique verte des instituts de recherche universitaire aux entreprises locales.

Le deuxième point, de la résistance au changement de l'utilisation des procédés de construction conventionnels a été identifié comme l'obstacle le plus critique à l'adoption des GB dans certaines études antérieures ([111]; [114];[127]). Au présent de cette étude, il n'était pas considéré comme un obstacle critique, résultant des idées traditionnelles profondément enracinées des parties prenantes. Cet obstacle est étroitement associé à d'autres obstacles tels que les coûts plus élevés des GB, le manque de mécanismes de financement, le manque de sensibilisation aux GB et à leurs avantages et la méconnaissance des GB.

Le dernier obstacle en relation « Attitudes, culture, mode de vie et comportements », on se concentre sur l'acceptation socio-politique des bâtiments verts, comme explique Zhao *et al*. (2015)[128], l'acceptation socio-politique est dérivée de trois parties : les décideurs politiques, les investisseurs et le public. L'acceptation sociale par les attitudes du grand public subdivisées en acceptation sociale

« Active » et « Passive », où le « Passif » fait référence à la décision d'achat qui est encouragée et stimulée par les incitations gouvernementales. Mais « Actif » signifie une satisfaction des occupants. Pour les comportements d'achat des consommateurs, actuellement au Maroc le principe du volontariat est adopté.

- Cluster 3 : Obstacles liés à la phase de conception, B5, B8 et B11.

Ce cluster se compose de trois barrières principales liées à la première phase du projet GB : B5« Manque d'intérêt exprimé par les clients et la demande du marché », B8« Risques élevés associés à l'investissement » et B11« Manque de conception intégrée pour la gestion du cycle de vie ».

On observe que les métiers en amont du projet de la construction des bâtiments (architectes et consultants) classent le manque d'intérêt par les clients en tête des obstacles de développement des bâtiments verts, expliqués par l'impact des autres obstacles sur l'intérêt de construire d'une façon durable. Cela indique que la plupart des clients particuliers et la haute direction des entreprises de l'immobilier ne sont pas convaincus qu'il soit nécessaire d'exiger de telles démarches durables dans leurs projets. Avec cette situation, les entreprises de construction s'inquiètent de la faisabilité d'établir des projets GB et le risque élevé d'investissement. Dans les projets de GB, l'investissement initial est plus élevé que dans les projets conventionnels, par conséquent, compter sur le financement pour résoudre le manque de fonds entraîne des risques plus élevés [129]. Des études analysent les facteurs de risque d'investissement dans des projets des bâtiments verts, comme le montre l'étude d'une équipe Singapourienne en 2017 Hwang *et al*. (2017)[130] ont déterminé que l'« Inflation », « Volatilité des taux d'intérêt » et des « Devises aggravées par l'importation de matériaux verts », « Risque d'estimation d'investissement », et « Pénurie des matériaux verts », qui peuvent influencer les opportunités d'investir dans les projets des bâtiments verts. Les fluctuations des prix de la main-d'œuvre et des technologies de la construction verte sont liées avec les prix du pétrole et de l'acier dans le monde [130]. Les conclusions de cet obstacle suggèrent que le niveau de risque que les parties prenantes sont prêtes à accepter joue un rôle majeur dans l'adoption de nouveaux GB. Par conséquent, il est recommandé au gouvernement de jouer un rôle proactif dans la compensation des risques et les prêts à faible taux d'intérêt.

Le manque d'une conception intégrée du bâtiment est perçu comme le deuxième obstacle important à l'adoption des pratiques de GB par le groupe des répondants « Architecte ». Il est clair que le processus de conception intégrée est une méthodologie nouvellement introduite dans les projets de l'industrie du bâtiment au Maroc. Les tâches de la construction durable ne sont pas réalisées par une seule action ou entité, mais nécessitent une approche d'équipe multidisciplinaire et la mise en œuvre de processus itératifs lors de la conception et de la construction du bâtiment. Un processus de conception intégrée (IDP) intervient pour s'assurer que tous les problèmes dont on peut prévoir qu'ils auront un impact significatif sur la performance des bâtiments verts sont discutés, compris et traités

au tout début du processus de conception [131]. Le Conseil national des architectes au Maroc, en collaboration avec les différentes parties prenantes (ingénieurs et les membres de MGBC) doit élaborer un guide de processus de conception intégrée de collaboration pour les projets des bâtiments verts. Ils peuvent s'inspirer des expériences des pays développés. Par exemple : aux États-Unis, le « Integrated Project Delivery Guide » a été préparé par l'American Institute of Architects, pour renforcer les compétences de l'architecte dans la gestion des équipes de conception et fournir une plateforme de collaboration. Un autre guide IDP, « Integrated Design Build Method (IDBM MT), a été élaboré en Danemark par des praticiens (architectes, ingénieurs et entrepreneurs) comme une approche d'architecture durable basée sur la collaboration entre les universitaires, des ingénieurs et des entrepreneurs [132].

- Cluster 4 : barrières économiques et technologiques ; B4, B7 et B12.

Ce groupe se compose de trois barrières critiques : B4« Coûts d'investissement élevés de la construction écologique » ; B7« Complexité du projet » et B12« Indisponibilité des technologies de construction écologiques ».

Le coût est un obstacle majeur à l'adoption des pratiques écologiques non seulement au Maroc, mais aussi dans de nombreux pays développés [133]. Les bâtiments verts coûtent généralement beaucoup plus cher que les bâtiments conventionnels. La recherche de Sun *et al*. (2019)[134] a établi pour les projets des bâtiments verts un surcoût variant entre 5 - 15 % selon le type du bâtiment et le contexte du projet. Les surcoûts initiaux d'investissement peuvent être compensés dans une perspective de cycle de vie.

« L'approvisionnement des technologies de la construction verte » a été classé quatrième dans les obstacles de développement des bâtiments verts. Ce facteur de risque tend à entraîner l'indisponibilité des matériaux, des équipements et des installations. D'un bâtiment vert, certains matériaux, équipements ou installations spécifiquement destinés à la construction verte sont susceptibles d'être importés de l'étranger, nécessitant plusieurs semaines ou mois pour être livrés sur site. De plus, peu de sources d'approvisionnement alternatives rendent le remplacement difficile en cas de retard dans l'expédition. Ainsi, tout incident technique sur la livraison des matériaux importés, en particulier ceux concernant les étapes critiques dans un calendrier auraient un impact négatif sur le calendrier du projet. Ce résultat est cohérent avec l'étude de Hwang *et al*. (2017)[130] qui montre que la livraison tardive de matériaux et d'équipements était l'une des principales causes de retard dans les projets verts à Singapour. Cela suggère que la chaîne d'approvisionnement actuelle liée à l'industrie des GB est immature avec une pénurie de fournisseurs locaux.

Afin de surmonter ces obstacles, les 167 participants au questionnaire ont classé les moteurs selon le niveau d'importance sur même échelle de Likert.

3.5. Analyse de la hiérarchisation les moteurs de développement des bâtiments verts

3.5.1. Analyse descriptive des résultats

Les scores moyens pour les 16 moteurs vont de M= 2.44 (SD = 0.98) pour M4« Support à l'économie nationale » à M = 3.92 pour M1« Demande du client » avec un écart type de 0.82 (Tableau 14). Les valeurs supérieures de 0.50 normalisées ont été utilisées dans l'étude pour identifier les moteurs hautement significatifs dans le déploiement de la durabilité dans le secteur du bâtiment au Maroc. L'étude a identifié les cinq moteurs les plus importants, à savoir : M1« Demande du client », M3« Réglementation complète du GB » (M =3.78, SD = 0.87), M15« Réduction des coûts du cycle de vie » (M= 3.50, SD= 0.97), M9« Préservation des ressources naturelles (Energie & Eau) » (M= 3.20, SD=1.02) et M16« Efficience de gestion pendant la phase conception et construction » (M= 3.19, SD=1.15).

Tableau 14: Classement les moteurs de l'adoption des GB au Maroc (Source : Auteur,2023)

	Les répondants				**ANOVA**
	Moy	**SD**	**R**	**N**	
M1. Demande du client	3.92	0.82	1	1.00	0.016*
M2. Augmentation de la prise en conscience	2.69	1.11	14	0.17	0.000*
M3. Réglementation complète du bâtiment vert	3.78	0.87	2	0.91	0.000*
M4. Support à l'économie nationale	2.44	0.97	16	0.00	0.000*
M5. Etablir un système d'évaluation de la durabilité des bâtiments	3.14	1.07	6	0.47	0.000*
M6. Réduction des taxes	2.84	0.97	11	0.27	0.000*
M7. Responsabilité sociale des entreprises	2.91	1.12	10	0.32	0.000*
M8. Augmentation de la valeur du bâtiment	2.71	1.10	13	0.18	0.000*
M9. Préservation des ressources naturelles (Energie & Eau)	3.20	1.02	4	0.51	0.000*
M10. Améliorer la santé et le confort des occupants	2.66	1.01	15	0.15	0.356
M11. Incitation financière et non financière	2.96	1.00	9	0.35	0.002*
M12. Réduire les impacts environnementaux	2.98	0.88	8	0.36	0.005*
M13. Innovation dans les technologies vertes	3.09	1.19	7	0.44	0.000*
M14. Bonne image des entreprises	2.78	1.01	12	0.23	0.051
M15. Réduction des coûts du cycle de vie	3.50	0.97	3	0.72	0.000*
M16.Développement de la recherche et de la formation	3.19	1.15	5	0.51	0.000*
Kendall's W Sig.	0.141 0.00				
Moy : Moyenne ; SD : Écart-type ; R : Rang ; N : Valeur normalisée = (moyenne - moyenne minimale) ÷ (moyenne maximale - moyenne minimale), * une différence significative entre les deux groupes de classification les moteurs (<0.05) (Annexe J).					

Il existe un accord considérable entre les répondants de même groupe sur le classement des 16 moteurs, alors que les valeurs de l'indice W de Kendall des 4 groupes (architectes, enseignants-

chercheurs, consultants et les cadres) successivement de 0.247, 0.405, 0.19 et 0.275 étaient donc inférieur à 0.05 (Annexe J). A la dernière colonne du tableau 14, des tests statistiques paramétriques tels que l'ANOVA a été appliquée aux données rassemblées pour étudier toute divergence dans les perceptions des différents groupes des participants, en fonction de leur profil professionnel (Architectes, enseignants chercheurs, cadres, etc.). Les valeurs de signification l'ANOVA des deux moteurs M10« Améliorer la santé et le confort des occupants » et M14« Bonne image des entreprises (immobiliers) » supérieure à 0.05, indique qu'il n'y avait pas de différence statistiquement significative dans les perceptions de l'importance les deux moteurs par les quatre groupes. Cependant, pour les autres moteurs (M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M11, M12, M13, M15 et M16) une différence significative (<0.05) apparait entre le classement des moteurs de développement des GB par les quatre groupes et le test de Tukey a révélé les groupes divergents dans le classement de ces facteurs. A titre d'exemple de l'annexe (J) : le 3éme groupe (enseignant-chercheur) donne plus d'importance aux deux moteurs M2« L'augmentation de la prise en conscience » et M16« Développement de la recherche et de la formation » par rapport aux autres moteurs, en revanche aux trois autres groupes (G1, G2 et G4). Cette interprétation est confirmée par le test des étendues de Tukey qui indique une différence significative entre G1<>G3, G2<>G3 et G3<>G4. De même, pour le groupe d'architectes (G1) et de consultants (G3) qui classe la mise en place d'un système national de certification des bâtiments parmi les cinq premiers moteurs de développement des bâtiments verts dans le marché marocain. Les architectes classent les moteurs M1« Demande du client », M3« Réglementation complète du bâtiment vert » et M15« Réduction des coûts du cycle de vie » en tête des 16 moteurs, cela s'explique par le fait que les architectes travaillent en collaboration avec les clients pour s'assurer que le projet du bâtiment est conforme aux cadres et normes appliquées dans les projets de construction. Cette relation entre le maître d'ouvrage et l'architecte et le fait qu'ils ne sont plus impliqués en amont des projets de construction, rend leur perception identique de ces trois moteurs de développement des bâtiments verts avec une mise en tête de classement.

3.5.2. Classification les principaux moteurs sur la base du clustering

Lors de la conduite de l'analyse de cluster hiérarchique par l'analyse « Classify » du logiciel statistique SPSS [124], les résultats d'analyse sont présentés dans un dendrogramme, comme le montre la figure 31. Après les résultats de la classification, on trouve des moteurs agrégés dans des groupes totalement différents, dans le premier cluster, on trouve les moteurs suivants : M2 « Augmentation de la prise en conscience », M4 « Support l'économie nationale », M8 « Augmentation la valeur du bâtiment », M10 « Améliorer la santé et le confort des occupants », M12 « Réduire les impacts environnementaux » et M14 « Bonne image des entreprises (immobiliers) ». De même pour les deux autres clusters. Après cela nous avons essayé de reclasser les moteurs avec la méthode de l'analyse en composante

principale (ACP) en utilisant la méthode de rotation Varimax, on trouve une hétérogénéité d'un même groupe, donc les données recueillies ne permettent pas d'établir le clustering homogène entre les moteurs.

Dans ce cas, nous avons adopté le modèle « PESTLE » proposé par Assylbekov *et al.* (2021)[135]. Alors, nous avons reclassé les 16 moteurs à l'aide du modèle PESTLE : politiques, économiques, socioculturels, technologiques, juridiques et l'environnement.

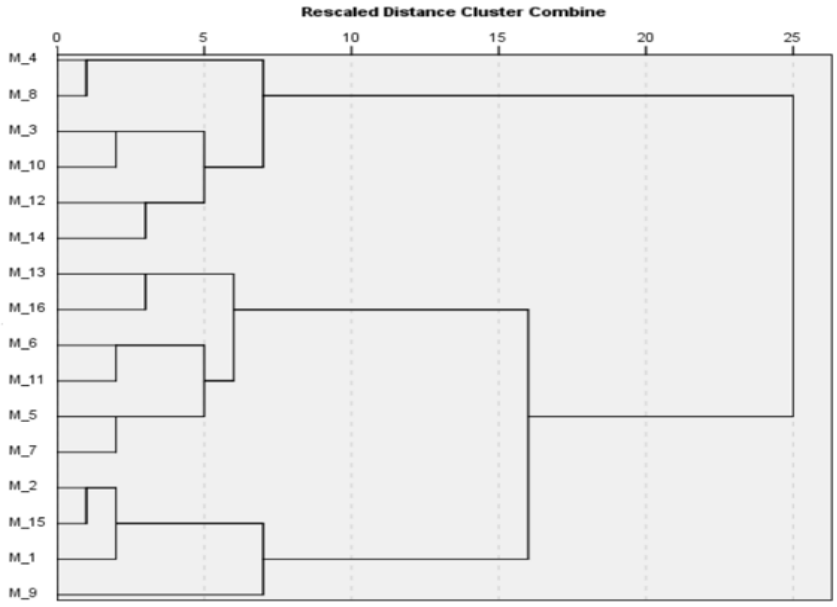


Figure 31: Résultats de l'analyse en clusters hiérarchiques les moteurs de développement des GB (Source : Auteur,2023)

- Moteurs politiques : Ce groupe met en évidence le rôle du gouvernement dans la promotion de l'adoption des GB au Maroc, il est représenté par quatre moteurs critiques : M6 « Réduction des taxes », M11 « Incitation financière et non financière » et M16 « Développement de la recherche et de la formation ».

L'engagement du gouvernement marocain à instaurer une stratégie durable dans le secteur du bâtiment est un moteur clé. Le gouvernement peut créer un cadre ou des stratégies pour les bâtiments verts. Pour ce faire, il faut fournir aux intervenants de l'industrie du bâtiment des lignes directrices sur les bâtiments verts et programmer des séries de formation aux différentes fédérations professionnelles. Néanmoins, le gouvernement peut booster la recherche et développement dans les thématiques liées aux bâtiments verts, par la création d'instituts/centres de recherche sur l'innovation technologique verte, l'éducation/la formation et le recrutement d'experts qualifiés pour les GB, comme le cas du Green Energy Park développé par l'IRESEN (l'Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Nouvelles). Finalement, il est nécessaire que le gouvernement mette en place des programmes d'incitation. Apprendre des expériences des pays avancés dans le domaine de construction durable serait une approche très utile pour promouvoir l'adoption des GB au Maroc. Aux États-Unis, des incitations telles que le paiement monétaire direct, le crédit d'impôt sur le revenu et la prime de densité ont été adoptées par de nombreux États pour stimuler la demande des parties prenantes. (En Californie, le programme de Pasadena offre 15000 USD (1USD≈10 MAD) de subventions aux projets qui obtiennent la certification LEED avec le niveau certifié. Un exemple d'un système

d'incitation non financière est le système de surface brute de plancher (GFA). L'incitation GFA a été mise en œuvre par le gouvernement de Hong Kong, le GFA signifie que la surface au sol peut être déduite de la GFA totale, à la condition préalable d'avoir la certification BEAM [136]. L'exemple du programme d'incitation des bâtiments certifié par Green Mark lancé par l'autorité du bâtiment et de la construction de Singapour (BCA) est intéressant, il partage les incitations selon les parties prenantes au projet. Pour les promoteurs/propriétaires d'immeubles jusqu'à 3000 USD pour GM Gold, 5000 USD pour GM Goldplus, 6000 USD pour GM Platinum pour un projet de 1000 m² et pour les architectes et ingénieurs jusqu'à 500 USD (chacun) pour GM Gold, 800 USD (chacun) pour Goldplus, 1000 USD (chacun) pour GM Platinum [137]. De plus pour les propriétaires atteignant une note Green Mark GoldPLUS ou Platinum, l'Autorité de réaménagement urbain accordera une surface de plancher supplémentaire au-delà du contrôle du ratio de parcelle brute du plan directeur, jusqu'à 1 % et 2% supplémentaire.

Actuellement, au Maroc des projets verts sont financés par différents fonds internationaux, comme le programme Morocco Sustainable Energy Efficiency Financing (MorSEF) qui finance des projets d'efficacité énergétique et énergie décarbonisé. En revanche, le gouvernement marocain a intégré les projets « Bâtiment durable » dans la liste d'éligibilité aux deux programmes d'investissement et d'accompagnement « Verts » des entreprises par le bond de financement « Green Invest (Tamwilcom) » et « Green Economy Financing Facility – GEFF (BERD/Banques Partenaires) », pour la rénovation ou la construction de nouveaux bâtiments durables. Ce programme s'intéresse aux bâtiments industriels et tertiaires (bâtiments commerciaux, hôtels, cliniques, écoles, bureaux,...). Ce package d'incitation néglige des projets des bâtiments résidentiels. Cependant, les démarches administratives lourdes dans le montage des projets de financement vert pour les particuliers imposent un accompagnement par les experts dans le domaine de la finance verte, d'où l'intérêt d'établir des fonds nationaux simplifiés pour récompenser les initiatives du GB. Au contraire de l'incitation, le pouvoir public peut appliquer le principe consommateur/pollueur payeur qui va forcer les parties prenantes à l'adoption des démarches vertes dans l'industrie du bâtiment. Brotman(2016)[138] a observé que lorsque les factures des services publics sont élevées, les parties prenantes adoptent des technologies d'économie d'énergie. Windapo *et al.* (2014)[139] a constaté en Afrique du Sud que la hausse des coûts énergétiques est devenue un moteur essentiel pour les parties prenantes à intégrer des principes de GB dans leurs projets.

- Moteurs économiques et financiers : Ce groupe se compose de cinq moteurs critiques : M4« Support l'économie », M8« Augmentation la valeur du bâtiment », M14« Bonne image des entreprises (immobilier) », M15« Réduction des coûts du cycle de vie » et M7« Responsabilité sociale des entreprises ».

Comme nous l'avons discuté dans l'axe des barrières économiques au développement des bâtiments verts, les moteurs économiques liés à la rentabilité du projet vert sont primordiaux à leur développement. L'étude de l'équipe d'Ahachad *et al.* (2016)[140], montre que les projets d'efficacité énergétique au Maroc demandent un recrutement annuel de plus de 17500 emplois pour les ingénieurs, cadres, techniciens, ainsi que les ouvriers d'ici la fin 2030. La chaine d'approvisionnement en termes des matériaux, des produits locaux de construction et la création de l'emploi, supporte directement l'économie locale. La barrière de surcoût peut être surmontée en évaluant des coûts du cycle de vie (LCC) des GB sur le marché marocain. Dans le contexte du Sri Lanka, Weerasinghe *et al*. (2021)[141] montre que le coût de construction des bâtiments verts est d'environ 29 % supérieur à celui des bâtiments non verts, tandis que les GB offrent des économies de 23 % en fonctionnement et de 15 % en maintenance. En revanche l'application des pratiques durables en particulier celles qui améliorent la productivité des individus dans l'environnement de travail, le confort thermique et la qualité de l'air, entraînent une augmentation de la productivité de 6 % à 25 %, une diminution de l'absentéisme de 15 - 25 % et une rétention des employés professionnels [64], ce qui peut avoir un impact positif sur l'économie des bâtiments tertiaires (industriels et les bureaux). Les constructeurs qui souhaitent renforcer leur réputation et leur compétitivité ont commencé à intégrer des stratégies vertes dans leur stratégie marketing [142]. Construire durable montre l'engagement du propriétaire envers la responsabilité sociale. Il est reconnu que la responsabilité sociale des entreprises est un enjeu majeur affectant la compétitivité, l'image des entreprises et ainsi de gagner la confiance des clients [143][144].

- Moteurs socioculturels : Ils se composent de trois moteurs principaux liés aux utilisateurs M1« Demande du client », M2« Augmentation de la prise en conscience » et M10« Améliorer la santé et le confort des occupants ».

Le premier moteur auquel les répondants se sont référés pour mettre en œuvre des bâtiments verts était la demande des clients. La demande du client est étroitement liée à des questions telles que la connaissance, la valeur et le coût. Les clients et le public s'engageront à adopter les pratiques de GB s'ils sont mieux informés et éduqués sur les avantages. Laura B. Cole en 2013 introduit le terme Teaching Green Buildings (TGBs)[145] qui se base sur des expériences d'apprentissage pratiques « *Learning by doing* » telles que les bâtiments scolaires verts, de la maternelle jusqu'à l'enseignement supérieur. En 2006, la Fondation Mohammed VI pour la protection de l'Environnement a initié le programme Eco-Ecole au Maroc. Ce programme met en avant une approche pédagogique volontaire, visant à encourager les élèves à jouer un rôle actif dans l'amélioration de leur établissement en matière d'enjeux environnementaux (Efficacité énergétique, eau, air, biodiversité et changements climatiques). Donc, là on encourage les établissements universitaires à participer aux programmes internationaux de classement des universitaires selon les performances de durabilité. Comme

l'Université Mohammed-V de Rabat a été classée en 838 sur 1050 participants au classement « UI GreenMetric-2022» [146]. En parallèle, l'éducation par le biais des programmes télévisés et les réseaux sociaux et des meilleurs flux d'information et de communication ont une influence significative sur le niveau de connaissances et de sensibilisation des parties prenantes et du grand public [147].

De plus, le moteur de la santé et le confort des utilisateurs encourage à adopter des bâtiments verts, a été observé dans la période de confinement de la pandémie COVID 19, l'intérêt s'était accru des performances des bâtiments verts sur la protection santé physique et mentale des occupants [148]. Une étude récente a révélé que les occupants des bâtiments certifiés verts pouvaient obtenir un score de 30 % de moins de symptômes du syndrome des bâtiments malsains et bénéficier d'une qualité de sommeil 6 % supérieure à celle des occupants des bâtiments conventionnels [149].

- Moteurs technologiques : M13« Innovation dans les technologies vertes ».

Le développement des bâtiments verts nécessite plus de technologie dans l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Ces technologies sont regroupées en cinq grandes catégories : technologies d'efficacité énergétique, technologies d'efficacité de l'eau, technologies d'amélioration de la qualité de l'environnement intérieur, les matériaux de construction et systèmes de contrôle (domotique) [150]. La plupart de ces technologies sont importées d'autres pays comme la Chine et l'Union Européenne. Alors que les fournisseurs locaux des matières et technologies vertes jouent un rôle important dans l'approvisionnement continu. Les centres d'innovation nationaux dans les établissements universitaires publics ou privés, comme le Centre des Techniques et Matériaux de Construction (CETEMCO) peuvent booster l'innovation dans l'industrie du bâtiment.

- Moteurs juridiques : M3« Réglementation complète du GB » et M5 « Etablir un système d'évaluation de la durabilité des bâtiments ».

Comme nous l'avons démontré dans l'axe 2.3.5 du chapitre 2, la réglementation nationale est limitée et les stratégies dans le secteur du bâtiment ne font pas de bâtiments verts. Etablir un système règlementaire complet « Bâtiments verts » devient le deuxième moteur pour booster les bâtiments verts, malgré l'absence des mécanismes indépendants de veille sur l'application des normes techniques, les moyens de contrôle insuffisants. L'utilisation des systèmes de certification offre un appui à la réglementation obligatoire. Ils offrent des exigences et des orientations mettant l'accent sur les aspects environnementaux, ce qui démontre l'importance et l'influence des systèmes de certification.

- Moteurs environnementaux : Ce cluster met en évidence le rôle des considérations environnementales dans la promotion de l'adoption des GB au Maroc, il est représenté par deux moteurs : M12« Réduire les impacts environnementaux » et M9« Préservation des ressources naturelles (Energie & Eau) ».

Un bâtiment écologique est conçu pour atténuer les impacts environnementaux pendant son cycle de vie, en utilisant efficacement les ressources en eau et en énergie, et en tenant compte de la santé et du confort. Les bâtiments verts offrent des performances supérieures aux bâtiments traditionnels pour économiser l'énergie d'environ 30 % à 50 % [151], l'eau de 40 à 60 % [152]. Ce qui se traduit par la réduction de l'empreinte carbone et l'empreinte eau du secteur du bâtiment. De plus, comme les bâtiments verts mettent l'accent sur l'importance des matériaux à faible impact sur leur cycle de vie, elle aide à réduire l'empreinte écologique du secteur de construction et à conserver les ressources naturelles limitées. En phase de maintenance, le remplacement des éléments du bâtiment est moins fréquent, moins de déchets de maintenance produits et moins de ressources vierges sont nécessaires par rapport au bâtiment conventionnel [153]. A titre d'exemple, les pratiques durables dans l'industrie du bâtiment réduisent les déchets de construction et de démolition par rapport aux bâtiments conventionnels entre 20 à 30 % dans le contexte de Hong Kong [154].

3.6. Comparaison avec les pays de la région MENA et les pays développés

Pour évaluer l'effet du contexte sur les paradigmes de développement des GB, les résultats de cette enquête ont été comparés à ceux d'autres études menées dans certains pays de la région MENA et les deux pays leaders dans le domaine des bâtiments verts, les États-Unis et le Royaume-Uni. Une analyse des obstacles et des moteurs pour chaque pays donne un aperçu des facteurs qui freinent la mise en œuvre des bâtiments verts et de la manière dont les parties prenantes peuvent s'associer pour remédier aux barrières identifiées. Plus encore, l'évaluation comparative aidera à éviter le problème de la généralisation des résultats de la recherche et fournira les similitudes. Le tableau 15 montre les cinq principaux obstacles à la mise en œuvre des bâtiments verts pour chaque pays. Les obstacles qui n'ont pas été classés parmi les cinq premiers obstacles dans l'un des pays sélectionnés sont marqués du symbole « × ». Il est intéressant de noter que les obstacles « Manque de la sensibilisation et de la demande du marché » et « Manque de soutien de la part des gouvernements » sont les seuls obstacles apparaissant parmi les cinq principaux obstacles à l'adoption des GB au Maroc et dans les quatre pays de la région MENA sélectionnés, avec un rang similaire.

Tableau 15: Cinq principaux obstacles au déploiement des GB au Maroc et dans certains pays (Source : Auteur,2023 [69])

Les cinq principaux obstacles à l'adoption des GB au Maroc	**A. Saoudite** [155]	**Iran** [156]	**Oman** [157]	**Jordanie** [158]	**USA** [103]	**UK** [159]
Absence de code et de la réglementation de la GB (Rang 1)	Rang 2	×	×	Rang 2	×	×
Manque d'intérêt du client et de la demande du marché (Rang 2)	Rang 5	Rang 1	Rang 4	Rang 1	×	×
Complexité du projet (Rang 3)	×	Rang 2	Rang 5	×	Rang 1	Rang 2
Indisponibilité des technologies de construction écologique (rang 4)	Rang 1	×	Rang 2	Rang 3	×	×
Manque de soutien gouvernemental(Rang 5)	Rang 2	Rang 4	Rang 3	Rang 4	×	×

Cela implique que la sensibilisation et la formation des parties prenantes ainsi que le manque de l'incitation gouvernementale constituent des obstacles majeurs à l'adoption des GB non seulement sur le marché de la construction au Maroc, mais aussi sur les marchés de la construction de nombreux pays de la région notamment l'Arabie saoudite, l'Iran, Oman et la Jordanie. L'augmentation des investissements et l'instabilité économique sont les obstacles les plus critiques à l'adoption des bâtiments verts dans les pays en développement. Cette comparaison révèle que les obstacles les plus importants à l'adoption des bâtiments écologiques dans les pays de la région MENA diffèrent globalement de celles des deux pays développés que sont les États-Unis et le Royaume-Uni. Cette comparaison a montré que malgré les progrès significatifs réalisés par certains pays d'Europe et d'Amérique en matière d'adoption des stratégies durables dans le secteur du bâtiment, des questions telles que la complexité des projets GB dans la phase de conception et de construction, ainsi que la surveillance des performances des bâtiments verts pendant la post-occupation.

La raison de ces différences pourrait être attribuée au fait que ces deux pays ont commencé à développer des bâtiments verts dans les années 1990 et ils ont mis en place des procédures obligatoires (normes) et des systèmes de certification des bâtiments, mécanismes d'encouragement et de sensibilisation les différentes parties prenantes. De même, une analyse comparative est menée sur les moteurs de développement des bâtiments dans les deux contextes différents.

La différence significative entre ces études de cas était le classement des cinq premiers moteurs (Tableau 16), mais en général les études dans les pays de la région MENA ont priorisé des moteurs liés au gouvernement, le cadre législatif et la formation des parties prenantes du secteur bâtiment.

Tableau 16: Cinq principaux moteurs au déploiement des GB au Maroc et dans certains pays (Source : Auteur,2023)

Les cinq principaux moteurs à l'adoption des GB au Maroc	**Égypte** [160]	**Kuwait** [111]	**Oman** [161]	**USA** [162]	**UK** [162]
Demande du client (Rang 1)	Rang 3	×	Rang 4	×	×
La réglementation complète du GB (Rang 2)	Rang 4	Rang 2	Rang 2	×	×
Réduction des coûts du cycle de vie (Rang 3)	Rang 1	×	Rang 5	×	Rang 2
Préservation des ressources naturelles (rang 4)	×	×	Rang 1	Rang 1	×
Développement de la recherche et de la formation	Rang 5	Rang 1	×	×	×

D'après, les résultats de l'analyse, le moteur M1« La demande du client », M3« La réglementation complète du GB » et M16« Développement de la recherche et de la formation » sont classés parmi les cinq premiers moteurs importants dans les pays de la région MENA à la différence des pays bien avancés dans la construction durable (USA et UK). En outre, le moteur M15« Réduction des coûts du cycle de vie » est classé parmi les cinq principaux moteurs dans la présente étude à Oman et au Royaume-Uni. Dans les pays développés, les moteurs liés plutôt à l'image et la culture de l'entreprise et les bénéfices économiques [163].

3.7. Résumé

Les principaux obstacles et moteurs qui influent sur la mise en œuvre des bâtiments verts au Maroc, vingt-huit facteurs d'obstacles et vingt moteurs ont été identifiés via une revue de la littérature documentaire. 12 barrières et 16 moteurs décrits dans un questionnaire ont été classés par 167 répondants de différentes régions du Maroc. Ces participants, dotés d'une expérience étendue dans le domaine des bâtiments verts, provenaient de diverses professions et organisations, ce qui crédibilise les données collectées. Entre-temps, l'étude a mené une évaluation comparative des perceptions des participants à l'étude en fonction de leur discipline professionnelle par les deux tests statistiques ANOVA et Tukey. Une conclusion importante de cette étude est que la plupart des groupes de répondants sont relativement d'accord sur le fait que le facteur B2« Manque de soutien du gouvernement » est un obstacle critique à la mise en œuvre des pratiques durables dans l'industrie du bâtiment. Par ailleurs, les résultats ont révélé que le groupe « Architecte » percevait l'absence des codes et réglementations GB nécessaires pour s'adapter aux exigences de la durabilité pendant la phase de conception et tout le cycle du bâtiment comme les obstacles les plus importants. Cependant, les consultants n'étaient pas d'accord avec la perception du groupe « Universitaire » selon laquelle l'obstacle B1« Manque d'expertise et de la formation professionnelle » est très significatif. D'autre part, les universitaires ont estimé qu'il y a un manque considérable du niveau de recherche sur ces concepts dans les universités ; cette perception est cohérente avec les résultats de l'analyse scientométrique du premier chapitre. Au niveau, les principaux moteurs de déploiement d'une politique durable dans l'industrie du bâtiment ont été exprimés par les répondants, notamment la nécessité d'établir un cadre réglementaire complet du GB (M3) et des programmes d'incitation (M11) et de développement de la recherche et de formation (M16) pour encourager les constructeurs à s'engager dans des projets verts. Parmi les moteurs importants figure la compétence technique du personnel des parties prenantes dans l'industrie des bâtiments, cela peut se faire par des formations et des ateliers formation de spécialistes transversaux par les organismes professionnels tels que la Fédération Nationale du Bâtiment et Travaux Publics et Conseil National de l'Ordre des Architectes.

Résumé de la partie

L'industrie du bâtiment contribue à la dégradation de l'environnement, conduisant à l'émergence du concept de « Bâtiment vert ». Une analyse scientométrique était menée sur la thématique de la recherche des bâtiments verts dans la région MENA, révèle une croissance de la production scientifique depuis les années 2001, avec une contributions principales à la recherche viennent des pays du Golfe et d'Iran, tandis que les unités de recherche marocaines ont publié deux articles.

Le Maroc s'engage dans la lutte contre le changement climatique et la transition énergétique dans le secteur du bâtiment, avec 74 projets certifiés dans le secteur privé entre 2014 et 2022. Cela, montre que le concept de GB est en train d'émerger dans le secteur du bâtiment. Cependant, l'adoption des bâtiments verts au Maroc est freinée par des obstacles, comme le B2 « Manque de soutien du gouvernement », B7. Complexité du projet » et B4. « Coûts d'investissement élevés ». Ces barrières peuvent être surmontées par les moteurs suivants : M3 « Réglementation complète du bâtiment vert », M11. « Incitations financières et non financières », et M15. « Réduction des coûts du cycle de vie ».

Les résultats de l'analyse scientométrique ont révélé l'émergence du domaine de la recherche « Développement des systèmes de certification (GBRS) » dans la région MENA. Les pays du Golf ainsi que l'Égypte ont mis en place des référentiels nationaux de certification des bâtiments verts, tandis que les pays d'Afrique du Nord, notamment le Maroc, sont en retard à cet égard. En effet, les répondants au questionnaire A ont classé le moteur M5« Etablir un système d'évaluation de la durabilité des bâtiments » en 6^{éme} place. Par conséquent, les participants recommandent d'établir le propre référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments adapté au contexte du Maroc, ce qui constituera notre objectif dans la deuxième partie.

PARTIE 2 : DÉVELOPPEMENT D'UN RÉFÉRENTIEL D'ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ DES BÄTIMENTS RÉSIDENTIELS DANS LE CONTEXTE DU MAROC

Aperçu de la partie 2

Dans la première partie de cette thèse, nous avons examiné en détail l'état actuel des bâtiments verts au Maroc en mettant en avant les obstacles et les moteurs pour le développement des bâtiments verts. Ensuite cette partie, nous nous sommes intéressés à l'objectif de développement du référentiel d'évaluation de la durabilité adapté aux bâtiments résidentiels au Maroc avec une approche holistique, prenant en compte le principe du Triple Bottom Line. De plus, il était impératif de prendre en considération les principes de durabilité à chaque étape du cycle de vie du bâtiment. La phase de conception est reconnue comme la phase fondamentale pour intégrer d'une conception durable dans les projets de construction, notamment les bâtiments. Nous avons ainsi élargi l'évaluation de la durabilité pour englober à la fois la phase de construction et d'utilisation du bâtiment. Le choix du bâtiment résidentiel s'explique par le fait que le secteur résidentiel représente 26 % de la consommation énergétique nationale, en comparaison aux 7 % du secteur tertiaire [164].

Pour ce faire, nous avons abordé en détail l'approche méthodologique de développement de ce référentiel en mettant l'accent sur les référentiels existants dans les pays de la région MENA qui partagent des similitudes climatiques et socio-économiques avec les conditions du Maroc.

En deuxième phase, nous avons exploité les résultats à l'aide de la technique de consensus « Delphi », ce qui a permis d'établir un accord entre les cent experts pour sélectionner les catégories d'évaluation prioritaires de la durabilité. Ensuite, nous avons focalisé sur la hiérarchisation du pilier « Environnemental » en sous-catégories et des critères d'évaluation. En parallèle, des fiches descriptives de chaque critère d'évaluation de la performance environnementale ont été élaborées, avec une pondération. Au dernier chapitre, nous avons procédé au test du référentiel proposé en l'appliquant à deux études de cas.

CHAPITRE 1 : Analyse des systèmes de certification des bâtiments verts

1.1. Introduction

Des organisations gouvernementales ont adopté des référentiels d'évaluation et de certification des bâtiments, tels que : Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), Building Research establishment Environmental Assessment Methods (BREEAM), Haute qualité environnementale (HQE) et Mostadam de l'Arabie saoudite, chacun ayant ses propres catégories et critères d'évaluation adaptés à leur contexte local. Ces référentiels s'ajustent en fonction du type du bâtiment (résidentiel, les hôpitaux et les écoles, etc.) pendant les différentes phases de vie du bâtiment.

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail neuf référentiels existants, à la fois dans des pays développés que dans ceux en voie de développement. Nous commencerons par présenter la structure fondamentale d'un référentiel, suivie d'un chronogramme de développement des GBRS, tout en mettant en évidence les engagements internationaux visant à promouvoir la durabilité dans le secteur du bâtiment. Ensuite, nous analysons le poids des différentes catégories de GBRS pour les bâtiments de type résidentiel, afin de conclure à quel niveau ces poids en adéquation avec le contexte local de chaque pays du référentiel. Par ailleurs, nous examinerons les critiques et les limites des référentiels existants.

1.2. Aperçu général

Les systèmes d'évaluation ou de certification des bâtiments verts, souvent désignés sous l'acronyme GBRS (Green Building Rating Systems) ont été développés pour fournir un ensemble de critères d'évaluation afin qu'ils puissent d'évaluer des aspects environnementaux pendant les phases du cycle de vie du bâtiment [165]. Toutefois, le WorldGBC a défini un GBRS comme « un outil utilisé pour évaluer et reconnaître les bâtiments qui répondent à certaines exigences ou normes » [166]. Ces outils ont été développés par des organismes indépendants, tels que des instituts de recherche, les conseils des bâtiments verts ou par des organismes gouvernementaux. Ces systèmes prennent en compte le cycle de vie complet du bâtiment, de la conception à la démolition. Alors que, les critères d'évaluation couvrent un large éventail de domaines, tels que l'efficacité énergétique, la gestion de l'eau, la qualité de l'air intérieur, etc. Depuis le premier système de certification BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), publié en 1990, plus de cinquante GBRS ont été développés (Figure 32). L'Afrique dispose de deux outils d'évaluation (Egypte et L'Afrique du Sud) , l'Asie de quatorze outils d'évaluation, l'Europe de 45 outils d'évaluation, l'Amérique du Nord de sept outils d'évaluation, l'Océanie de trois outils d'évaluation et l'Amérique du Sud de trois outils d'évaluation [167]. Les Trois systèmes BREEAM, HQE (Haute Qualité Environnementale) et LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ont été adoptés à l'échelle mondiale. BREEAM, jusqu'à mars 2023 délivré plus de 600000 certifications dans 93 pays [168]. Bien que LEED a été

développé après BREEAM, il y a plus de 120000 bâtiments certifiés dans plus de 160 pays [169]. Le référentiel HQE a certifié plus de 53000 bâtiments dans 24 pays, en majorité des pays francophones [170]. Cela pourrait s'expliquer par trois raisons principales. Premièrement, BREEAM cible le marché européen où la majorité des pays sont bien conscients de la durabilité. Deuxièmement, le référentiel LEED est considéré comme une approche de notation plus transparente et plus adaptable [171]. Le référentiel HQE est plus flexible que les deux autres systèmes dans le choix des objectifs et intègre le système management ISO 14001 dans le référentiel.



Figure 32: Distribution des référentiels de certification des bâtiments verts selon l'origine [167]

1.2.1. BREEAM

Le référentiel BREEAM a été lancé en 1990 par Building Research Establishment (BRE) comme le premier référentiel de certification des bâtiments verts. Il propose des certifications selon les phases de vie, comme : BREEAM new construction, BREEAM in-use et des bâtiments rénovés (BREEAM Refurbishment and fit-out)[172]. À l'heure actuelle, BREEAM dispose d'une famille de certification applicable dans différents pays tels que BREEAM_USA, BREEAM_Norvège et BREEAM_Gulf pour Émirats arabes unis. En effet, BREEAM a publié plusieurs version selon le type du bâtiment, tels que les bureaux, les écoles, les logements, les hôpitaux, les centres commerciaux, etc. Pendant la phase d'évaluation, chaque critère est noté en fonction des performances atteintes. Ces crédits sont ensuite pondérés et additionnés pour obtenir une note globale, se permit de classer les bâtiments à différents niveaux : Pass ≥ 30, Good ≥ 45, Very Good ≥ 55, Excellent≥ 70 ou Outstanding ≥ 85, en fonction de leur performance [172].

1.2.2. LEED

En 1998, l'United State Green Building Council (USGBC) a élaboré la première version de LEED. Il comprend un ensemble types de certification tels que LEED BD+C (Building Design and Construction), O+M (Building Operations and Maintenance) et ID+C (Design d'intérieur et construction) [169]. Cela s'applique pour les différents types des bâtiments, à savoir les écoles, les centres commerciaux, les centres de données, gares de transport, les bâtiments résidentiels, etc. Pendant la notation, les projets accumulent des points en fonction de leur conformité aux différentes catégories d'évaluation telles que les sites durables, l'efficacité énergétique, l'eau, les matériaux et ressources, la qualité de l'environnement intérieur, l'innovation, ainsi que les priorités régionales. La somme de points obtenue détermine le niveau de certification comme suit : Certified (40-49 points), Silver (50-59 points), Gold (60-79 points) ou Platinium (80+ points)[169].

1.2.3. HQE

Le référentiel Haute Qualité Environnementale (HQE) est une approche française développée par Certivéa, une filiale du groupe CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), en collaboration avec l'association HQE en 1996 [170]. En juin 2022, Certivéa a lancé deux nouvelles familles de certification à savoir HQE_Bâtiment (HQE-B) et HQE Bâtiment_Durable (HQE-BD). Ils s'appliquent à tous les types de bâtiments tertiaires (les bureaux, les commerces, les entrepôts, les hôtels, les campus, les musées, etc.). Ces certifications sont conçues pour évaluer et attester la qualité environnementale et le respect des critères de développement durable pendant la phase de conception construction, d'exploitation et de rénovation. Cependant, le référentiel HQE_résidentiel (version 2015) se base sur 14 cibles de performance, elles-mêmes organisées en quatre thèmes : environnement, énergie, confort d'usage et santé. Pendant la phase de notation, chaque thème s'évalue sur une échelle de 0 à 4 étoiles. Les bâtiments peuvent être certifiés à différents niveaux, tels que Pass (aucune étoile), Bon (de 1 à 4 étoiles), Très bon (de 5 à 8 étoiles), Excellent (de 9 à 11 étoiles) et HQE Exceptionnel (12 étoiles et plus, avec un minimum de 3 étoiles dans la catégorie énergie)[170].

Cependant, ces trois référentiels internationaux ont été utilisés dans des pays en développement qui ne sont pas adaptés à leur contexte. En conséquence, certains pays ont commencé d'élaborer des référentiel, qui intègre leurs spécificités locales. On trouve le système Pearl Rating System for Estidama pour les Émirats arabes unis, Green Pyramid Rating System d'Égypte et LOTUS développé au Vietnam.

1.3. Le schéma général des systèmes de certification des bâtiments verts

1.3.1. Structure

Les GBRS sont présentés avec différents niveaux hiérarchiques. Le nombre et la dénomination de ces niveaux varient selon les référentiels, mais on trouve souvent au moins trois niveaux. La hiérarchisation peut illustrer par un diagramme (Figure 33) donnant un aperçu de la structure des GBRS.

- Niveau 1 : il s'agit du niveau le plus élevé du système multicritère, qui représente la note finale obtenu après l'agrégation des points obtenus.
- Niveau 2 : les catégories, qui sont les principaux aspects de la durabilité considérés par un système d'évaluation ;
- Niveau 3 : les critères (indicateurs) permettent d'évaluer la performance d'un bâtiment. Chaque critère d'évaluation se compose d'un système de notation, qui attribue différents crédits et de pondérations (W) en fonction de leur importance pour certains référentiels.

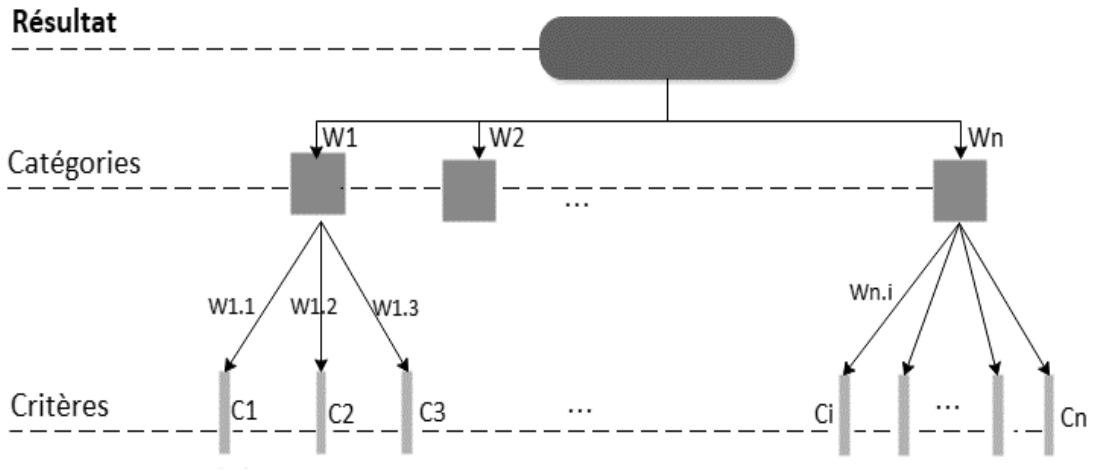


Figure 33: Hiérarchie principale du cadre de certification [173]

Une exemple de la hiérarchisation du référentiel LEED.V4_résidentiel pour la conception et la construction (DB+C) est présenté dans la Figure 34.

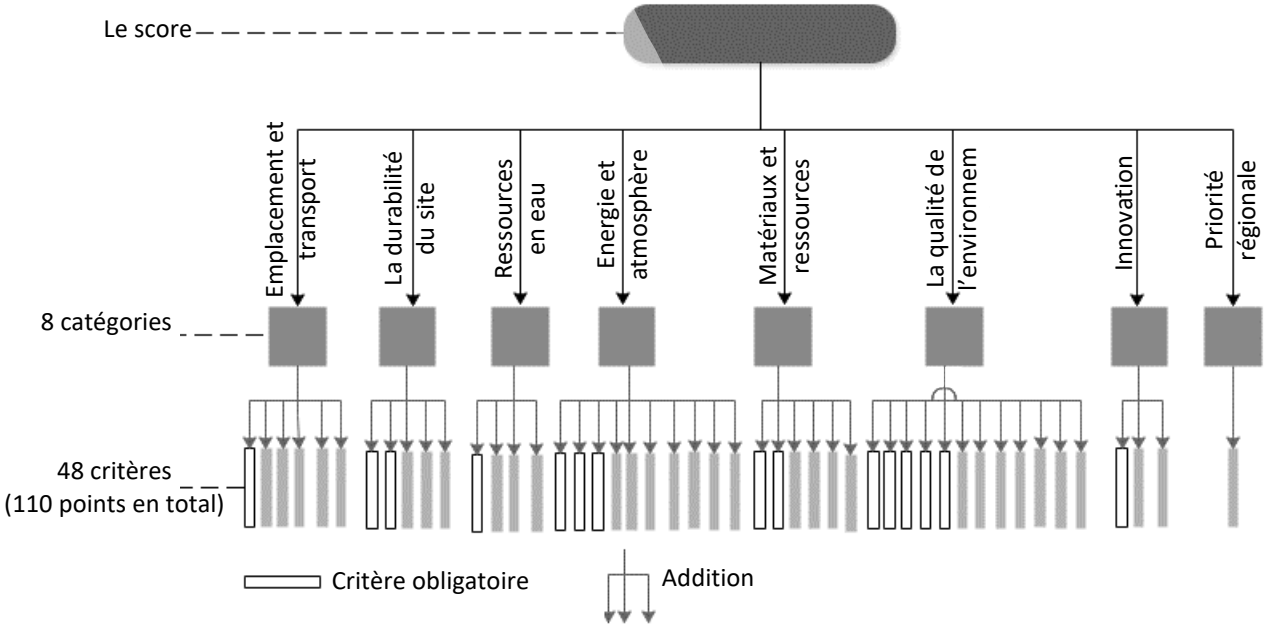


Figure 34: Structure hiérarchique du système LEED, type résidentiel V4_ BD+C (Source : Auteur,2023)

La hiérarchisation illustre comment LEED structure les enjeux environnementaux du bâtiment par huit catégories, chacune avec différents critères d'évaluation pour un total de 110 points. On trouve des

critères obligatoires (prérequis) avec un minimum de performance requis pour que le projet soit évalué et 10 points de bonus d'innovation.

1.3.2. Agrégation

Pour communiquer la note finale, les référentiels calculent les scores des critères utilisant un score agrégé final. La manière dont le GBRS agrège les critères et les catégories influence le résultat de l'évaluation. Les référentiels existants adaptent une agrégation additive, ce qui signifie une compensation totale entre les critères d'évaluation.

1.3.3. Périmètre

La dernière partie du GBRS couvre les limites fonctionnelles, spatiales et temporelles. Pour comparer la performance des bâtiments, il faut qu'ils offrent les mêmes services et la même fonction. La limite spatiale spécifie la partie du bâtiment qui est incluse dans l'évaluation ; cette limite entre le bâtiment et son environnement n'est pas toujours claire, car un bâtiment interagit avec l'infrastructure existante, telle que les sources de l'énergie disponibles sur le site, transport urbain et les services communs. Les limites temporelles sont liées aux phases du cycle de vie du bâtiment.

1.4. Analyse comparative des systèmes de certification des bâtiments verts

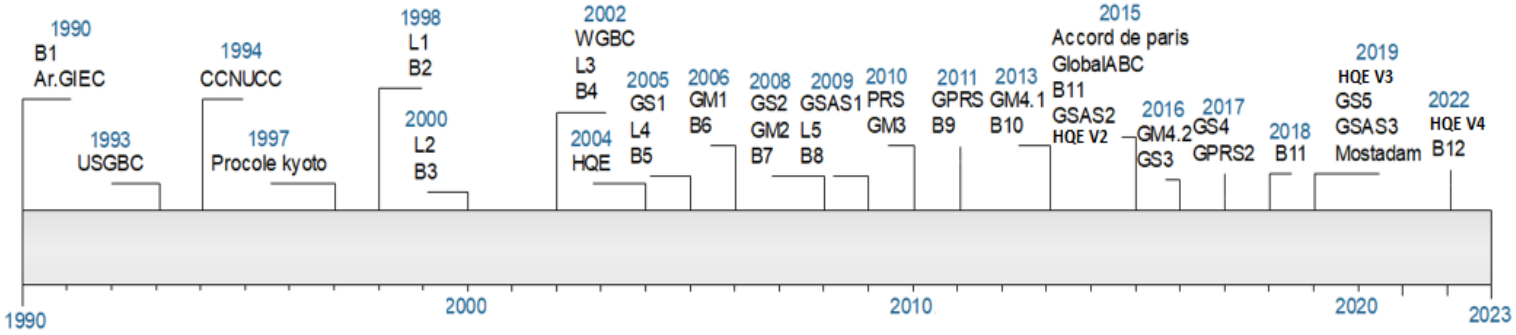
Pour comprendre l'évolution des référentiels des GB, nous avons réalisé une étude comparative des référentiels suivants : BREEAM, LEED, Green Mark (Singapour), Green Star (Australie), HQE, GPRS (Égypte), Mostadam (Arabie saoudite), PRS (UAE) et GSAS (Qatar). Les 4 derniers ont été sélectionnés du fait des similitudes des conditions climatiques et socio-économiques avec le Maroc. Dans la littérature, de nombreuses études ([174]-[177]) ont comparé les GBRS. Wallhagen *et al.* (2013)[173]ont élaboré une comparaison deux référentiels britanniques (LEED et Code for Sustainable Homes) et le référentiel EcoEffect du suède selon les catégories, le périmètre et la méthode d'agrégation. Kang *et al.*(2014)[174] ont comparé quatre systèmes d'évaluation les plus couramment utilisés (BREEAM, LEED, CASBEE-Japan et SBTool-canada) selon leur flexibilité, système de pondération et les phases du cycle de vie. Awadh *et al*. (2017)[179] ont analysé la différence entre LEED, BREEAM, Pearl Rating System (PRS) et le système Qatarien GSAS pendant la phase de conception des bâtiments tertiaires (commercial). Pareil, Pamu *et al.* (2019)[180] ont comparé six GBRS en Asie, selon la variation des catégories et les indicateurs de performance des bâtiments. Par la suite, l'étude de Zarghami *et al*.[181] en 2020 est plus large, les auteurs ont comparé les référentiels appliquées dans des pays développés et les pays en développement.

Ces études comparatives se concentrent sur la variation des catégories, des critères et le système de pondération. Aucune de ces études n'a établi des liens entre les grands événements de l'engagement international de développement durable et l'adoption des GBRS. C'est l'objectif de la première comparaison longitudinale qui s'intéresse à l'évolution temporelle des différentes versions des GBRS

sélectionnées. En second, nous examinons l'évolution du poids des catégories de la première version à la dernière version. Enfin, nous avons élargi la comparaison sur le processus de certification.

1.4.1. Analyse longitudinale

L'analyse longitudinale des différentes version de neuf référentiels, combinée avec les évènements internationaux liés à la lutte contre le changement climatique et le déploiement des bâtiments verts, est illustré dans la figure 35. Elle montre que le tout premier référentiel développé dans le monde était BREEAM. Il a été créé principalement pour démontrer que les bâtiments conçus par l'architecte Ron German Stanhope présentaient une meilleure qualité environnementale que d'autres sur un marché en pleine essor dans les années 1990. Ceci correspond avec le premier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), sur l'impact du secteur de construction et des bâtiments (rapport « AR1 : Impacts Assessment of Climate Change »).



B: BREEAM, L : LEED, HQE : Haute Qualité Environnementale, GS : Green Star, GM : Green Mark, GSAS : Global Sustainability Assessment System, PRS : Estidama Pearl Rating System, GPRS; Green Pyramid Rating

Figure 35: Chronologie du développement des référentiels « Bâtiments verts »(Source : Auteur,2023)

Au-delà des années 1990, les états s'engagent dans la problématique du changement climatique par la signature de la Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC) en 1994. En 1998, le référentiel BREEAM a subi une révision majeure sur les catégories de performance et intègre un système de pondération. Ensuite le BRE s'intéresse aux autres types de bâtiments, comme les bâtiments commerciaux (BREEAM Retail) introduits en 2004. L'US Green Building Council a développé LEED initialement en tant que programme pilote en 1998 (LEED 1.0). La deuxième version de LEED a été lancée en 2000. Après la création du World Green Building Council (WorldGBC) en 2002, des nouveaux systèmes d'évaluation ont été créés tels que : HQE en 2004, Green Star (Australie) et Green Mark (Singapour) qui ont été développés en 2006. Dans la période 2009-2011 trois nouveaux référentiels ont été développés au Qatar, aux Emirates et en Égypte. Nous avons remarqué que la plupart des pays mettent en place un système de certification qu'après la signature du protocole de Kyoto, traduisant un engagement pour intégrer les performances environnementales dans l'industrie du bâtiment. Le système qatarien GSAS a été renouvelé en 2019, avec différents types de certification comme « GSAS pour les complexes sportifs ». Récemment, l'Arabie saoudite en 2019 a établi leur système d'évaluation de durabilité Mostadam, dont l'objectif est d'intégrer la stratégie de

développement durable 2030 dans le secteur du bâtiment. Ces systèmes de certification sont soumis à un processus de révision pour refléter les avancées réglementaires, les technologiques et les meilleures pratiques en matière de durabilité.

Les référentiels BREEAM, LEED, HQE, GM, GPRS, GSAS et Green Star ont mis à jour de manière synchrone. Le Certivéa a fait une révision majeure sur le système HQE pour les bâtiments tertiaires en 2022. Les nouveaux référentiels HQE_bâtiment et HQE bâtiment durable ont été restructurés selon 22 catégories plus globales sur les trois piliers de durabilité (environnement, social et économie) au lieu de 14 cibles. Ceci afin de répondre aux politiques internationales de développement durable, notamment la « Taxonomie Verte » du plan européen et les exigences relatives à la réglementation environnementale 2020 (RE2020) de la France [182].

1.4.2. Analyse horizontale

Après cela, nous analysons la variation du poids des catégories d'évaluation selon les différentes versions historiques des GBRS sélectionnées type bâtiment résidentiel. Les données de cette étude proviennent principalement des manuels techniques des GBRS pour la conception et la construction fournis par leurs sites web et aussi certaines données sélectionnées à partir des études suivantes : [183]–[187]. Dans cette analyse, nous avons écarté le système HQE_résidentiel (V2015) car les cibles ne sont pas soumises à un système de notation comme les autres GBRS. Nous avons tracé l'évolution du poids normalisé des catégories depuis la première version jusqu'à la dernière version du système de certification (Figure 36).

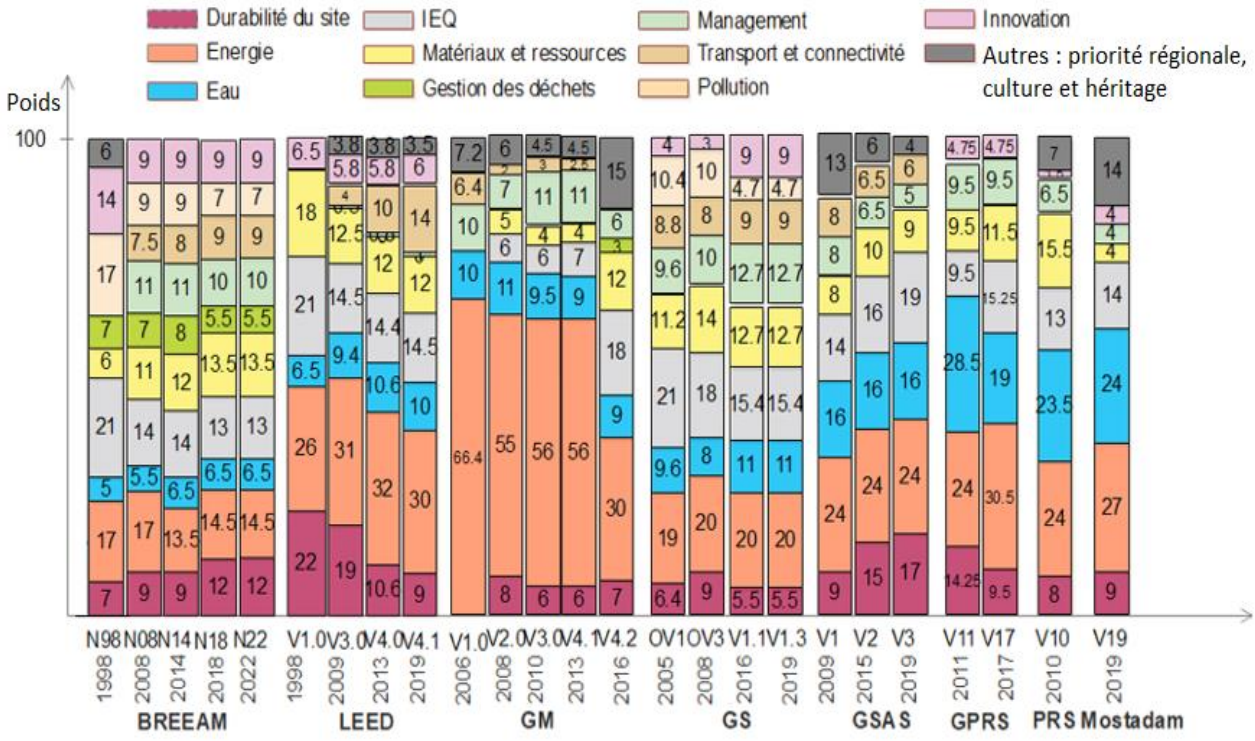


Figure 36: Variation les poids des systèmes de certification des nouveaux bâtiments résidentiels (conception et construction) (1998-2022) (Source : Auteur,2023)

Les catégories de « Durabilité du site », « Energie », « Eau » et « Matériaux de construction », sont toutes évaluées par les huit référentiels sélectionnés. Cela met en évidence que ces catégories sont des préoccupations mondiales pour la durabilité des bâtiments. Le poids de la catégorie « Energie » est de 67 % pour Green Mark en première version de 2006, ce qui traduit la stratégie de Singapour d'améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment où l'énergie fossile représente 99.97% de mixte énergétique dans les années de 2000.

L'importance du poids des deux catégories « Matériaux de construction » et « Qualité de l'environnement intérieur » reflètent leurs priorités majeures dans l'évaluation des bâtiments. Rappelons que l'industrie du bâtiment est responsable d'une forte consommation mondiale de matières premières (25 % du bois et 40 % des agrégats (pierre, gravier et de sable)). La catégorie « Qualité de l'environnement intérieur » se présente dans toutes les versions des huit GBRS. Cela montre l'importance des questions de la santé et le confort des occupants, comme une réponse de la définition des bâtiments verts « fournir aux gens un espace sain, applicable et efficace et une architecture naturelle harmonieuse » [188]. La catégorie « Gestion et management » des bâtiments verts a commencé depuis les années de 2000 dans tous les systèmes. En revanche, il est à noter qu'il y a une légère variation entre les différentes versions, en particulier lorsque des nouvelles catégories s'ajoutent au GBRS. Comme, le système BREEAM en 2008 a intégré une nouvelle catégorie concernant « Transport et la connectivité », le poids de la catégorie « Pollution » a diminué à 9 % dans la version suivante, par opposition à la catégorie « Matériaux » une croissance de 1.50 % dans les deux versions 2018 et 2022.

Globalement, dans les versions récentes des GBRS, le poids des principales catégories : « Durabilité du site », « Eau, « Energie », « Matériaux de construction » et « Qualité de l'environnement intérieur » ont tendance être stables. Une différence existe entre les systèmes pour le poids de la catégorie « Eau ». En moyenne, le poids de la catégorie « Eau » dans les systèmes de certification de la région MENA (GSAS, GPRS, PRS et Mostadam) (20.62 %) priorité en double fois que les autres systèmes. Cela, s'explique par la différence du niveau de stress hydrique. La catégorie « Innovation » est destinée à récompenser les techniques innovantes employées dans les projets du bâtiment et des performances exceptionnelles par des bonus des points. Les deux référentiels GM du Singapour et GPRS de l'Égypte n'ont pas spécifié la catégorie innovation dans la hiérarchisation, mais ils l'ont intégrée dans chaque catégorie d'évaluation.

En revanche, les deux référentiels du Moyen-Orient (Arabie saoudite et Qatar) ont introduit des critères d'évaluation liés à la culture et la protection de patrimoine islamique dans l'architecture moderne. On trouve des critères d'évaluation liés au pilier social tels que la santé et le confort des occupants. De même pour les performances économiques, comme le référentiel BREEAM dans la catégorie « Management » a introduit l'analyse les coûts de vie du bâtiment (LCC) comme critère.

Pendant cette comparaison, on remarque que l'importance des catégories diffère d'un référentiel à l'autre, ce qui nous amène à répondre à la question : Est-ce que les poids des catégories représentent les conditions locales des pays originaux ? Pour ce faire, nous avons actualisé et complété l'étude de R. Chandratilake et S. Dias (2013)[189]. Les auteurs ont étudié la corrélation du poids des catégories « Energie », « Eau » et « Durabilité du site » de neuf GBRS avec des indicateurs des pays comme l'énergie primaire par habitant, l'indice de stress hydrique et la densité de population. Nous avons ajouté la catégorie « Qualité de l'environnement intérieur » (IEQ).

Les données de la consommation d'énergie pour chaque pays sont basées sur la consommation d'énergie finale/an/hab et la densité de la population à partir des indicateurs de la Banque mondiale [190]. Le niveau du stress hydrique est basé sur les données de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)[191]. Pour le dernier indicateur, en absence des données de la qualité de l'environnement à l'intérieur de trois pays : Qatar, Egypte et l'Arabie saoudite dans la base de données de la société internationale de la qualité de l'air intérieur et du climat (ISIAQ). Nous nous basons sur les données de la pollution de l'air extérieur pour chaque pays sur le site web : https://www.aqi.in/ (Consulté le 08 décembre 2022) (Tableau 17).

Tableau 17: Corrélation entre les poids normalisés des catégories et les indicateurs des pays (Source : Auteur,2023)

GBRS	Consommation d'énergie finale/an/ hab	Poids d'énergie (%)	Densité de la population (Hab / Km²)	Poids du site (%)	Niveau de stress hydrique (2019)	Poids d'eau (%)	AQI [192]	Poids de IEQ (%)
BREEAM (UK)	2.3	14.50	278	12	14	6.50	38	13
LEED (USA)	6.17	30	36.24	9	28	10	22	14.5
GM (Singapour)	5.46	30	7918	7	82	9	22	18
GS (Australie)	5.11	20	3.34	5.50	4	11	10	15.4
GSAS (Qatar)	15.60	24	240	17	431	16	52	19
GPRS (Égypte)	0.82	30.50	108	9.50	141	19	68	15.25
PRS (Emirates)	8.83	24	130.70	8	1631	23.50	60	13
Mostadam (KSA)	6.38	27	16.75	9	974	24	32	14

Les corrélations entre les indicateurs spécifiques de chaque pays et les poids des catégories ont été calculées. Le poids de la catégorie « Energie » ne repose pas sur la consommation de l'énergie de chaque pays (R^2 <0.01). Cela peut expliquer par le fait que nous avons intégré des données de pays de la région Moyen-Orient où les considérations énergétiques ne peuvent pas être considérées importantes dans les systèmes de notation de ces pays.

Lorsque, nous avons considéré la disponibilité des terrains constructibles pour la corrélation avec le poids de la catégorie « Site ». Il a été jugé préférable d'utiliser la densité de la population urbaine. On obtient un coefficient de détermination (R^2) de 0.074. En excluant le Singapour, le coefficient R^2 obtenu est de 0.61 ce qui implique un assez bon degré de corrélation positive entre le poids de la catégorie «

Durabilité du site » et la densité de la population urbaine. La densité urbaine élevée du Singapour (7918 hab /Km²) est expliquée par la stratégie de la construction des tours pour optimiser la surface constructible limitée du pays.

Nous avons un coefficient de détermination élevé de 0.69 entre les poids de la catégorie « Eau » des GBRS et le niveau du stress hydrique. Le stress hydrique des pays de la région MENA (Qatar, Egypte, UEA et l'Arabie saoudite) est immédiatement évident, avec des poids les plus élevés par rapport aux autres pays de l'étude. L'Arabie saoudite a le poids le plus élevé de 24 % pour l'efficacité de l'eau. Le niveau de corrélation est faible (R^2= 0.21) pour la catégorie « Qualité de l'environnement intérieur » avec le niveau de pollution de l'air de chaque pays. A tire exemple, le poids de la catégorie IEQ du système de certification qatarien est de 19 % cela reflétant l'importance de la problématique de la qualité de l'air aux pays sahariens du fait d'inconfort thermique et d'une pollution de l'air par des tempêtes de sable.

On peut conclure que les contextes nationaux influencent plus ou partiellement les pondérations de certaines catégories des systèmes de certification.

1.4.3. Comparaison les critères d'évaluation de la catégorie « Energie »

Pour comprendre la variabilité des critères d'évaluation de même catégorie d'évaluation des GBRS, on prend l'exemple de la catégorie « Energie ». Le tableau 18 montre les critères énergétiques prises en compte dans les neuf GBRS type bâtiment résidentiel_conception/construction.

Tableau 18 : Critères énergétiques des GBRS sélectionnés (résidentiel) (Source : Auteur,2023)

Critères	LEED	BREEAM	HQE	GS	GM	GPRS	GSAS	Mostadam	PRS
Réduction de la consommation d'énergie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Surveillance de l'énergie	✓	✓	✓	-	-	✓	-	✓	✓
Eclairage (Intérieur et Extérieur)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Conception à bas carbone/bioclimatique	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	✓
Systèmes de déplacement à faible consommation d'énergie (Ascenseurs)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-
Équipements économes en énergie	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-
Satisfaction de la demande en énergie	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
Énergie renouvelable	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Réduction de la demande d'électricité en période de pointe	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-
Réduction îlot de chaleur	-	-	-	-	-	-	-	-	✓

Les critères « Réduction de la consommation énergétique », « Stratégies d'écoconception », « Equipements économes en énergie » et « Production d'énergies renouvelables » ont été pris en compte dans la plupart des GBRS. Notons que le critère « Surveillance de la consommation d'énergie » pendant la phase d'occupation présent dans six référentiels LEED, BREEAM, HQE, GPRS, Mostadam et PRS. Alors que le critère « Satisfaction de la demande en énergie » est considérée seulement par le

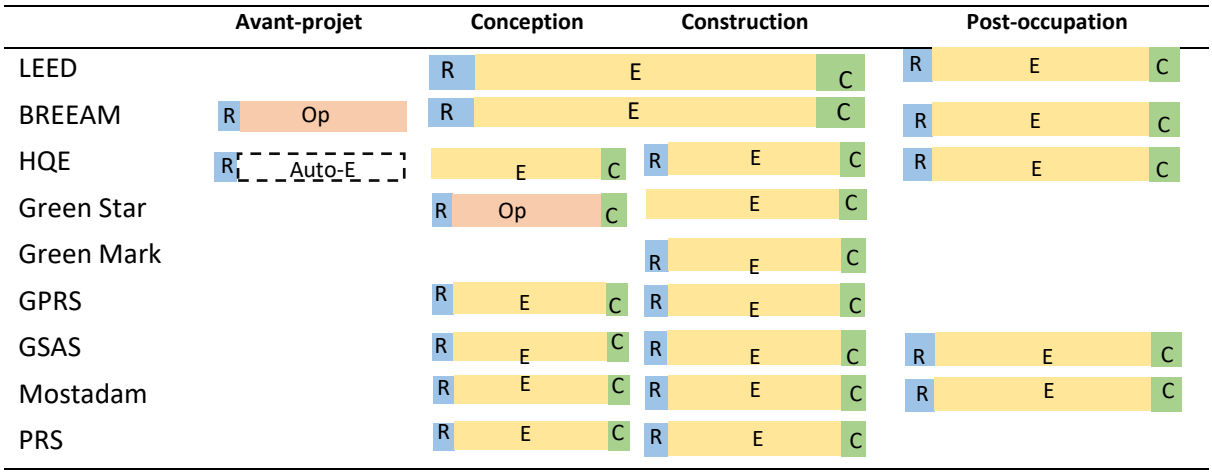
système LEED. Également, « Réduction de la demande d'électricité en période de pointe » est considérée par le référentiel Green Mark et le référentiel égyptien GPRS. On remarque que le système PRS a pris le critère « Réduction de l'îlot de chaleur » dans la catégorie « Energie », en revanche les autres systèmes l'ont intégré dans la catégorie « Section du site ».

L'importance de ces critères énergétiques diffère d'un référentiel à l'autre selon les conditions locales. A titre exemple : la production d'énergies renouvelables est fortement encouragée dans le référentiel PRS grâce à l'allocation de 11 points sur 42 points possibles de la catégorie « Energie », lorsque 20 % de la demande énergétique du bâtiment est fournie par des énergies renouvelables. BREEAM semble plus exigeant sur la notation des énergies renouvelables ; maximum de 3 crédits sur 13 pour une couverture de 100 % de la consommation d'énergie par des technologies à faible ou zéro carbone (Recognised low or zero carbon (LZC) technologies). Jusqu'à 3 points parmi les 35 points peuvent être acquis par LEED pour 10 % de production d'énergie renouvelable. Cette variation pourrait être liée à la disponibilité des ressources locales d'énergies renouvelables (ensoleillement ou autres), aux défis environnementaux locaux et aux subventions gouvernementales.

Donc on conclura que les GBRS ont des critères d'évaluation communs et d'autres spécifiques à chaque système de certification selon les conditions locales.

1.4.4. Processus de certification

Le processus de certification des neuf GBRS sélectionnés a été présenté selon les phases du projet (Figure 37). Dans l'ensemble, les résultats montrent la variété du processus d'évaluation ; les référentiels HQE, GSAS et Mostadam sont les plus complets, avec la possibilité d'évaluer toutes les phases : conception, construction et exploitation/post-occupation. Le référentiel BREEAM propose des alternatives qui permettent d'évaluer le projet soit au stade avant-projet, soit au stade de la conception et de la construction.



R signifie enregistrement, Auto-E : Auto-évaluation, Op : évaluation optionnelle, E : évaluation et C : certification.

Figure 37: Processus de certification des systèmes sélectionnés (Source : Auteur,2023)

Le système d'évaluation Green Star propose des choix optionnels permettant d'évaluer le projet au cours de la phase conception et même en construction. Seuls trois systèmes GM, GS et GPRS ne couvrent pas l'étape d'exploitation/post-occupation. L'auto-évaluation, est une procédure importante dans la procédure de certification, car elle peut aider les parties prenantes à clarifier leurs objectifs atteints et les améliorations possibles avant que le processus de certification [193]. Les référentiels sélectionnés ont montré une auto-évaluation insuffisante. Parmi les neuf référentiels, BREEAM et HQE ont fait l'objet d'une auto-évaluation complète tandis que le système Green Star est facultative.

Pendant le processus de préparation à la certification, les GBRS ont formé des professionnels accrédités (AP) pour accompagner les maîtres d'ouvrage à la mise en œuvre les exigences de la certification. Sur les 9 systèmes d'évaluation, 6 GBRS ont développé une certification des professionnels accrédités. Les exigences d'admission comme étant un professionnel accrédité sont similaires. Les systèmes internationaux (BREEAM, LEED et HQE) demandent aux candidats d'être titulaires d'un diplôme universitaire ou d'une qualification équivalente dans le domaine de la construction et d'avoir une expérience professionnelle. Mostadam recommande une formation d'ingénierie (génie civil et architecte) et une expérience professionnelle. En 2022, l'USGBC a accrédité plus de 57000 LEED_AP dans le monde. De même pour le système Mostadam, plus de 400 professionnels sont accrédités pour accompagner les projets de certification à l'Arabie saoudite.

A la fin du processus d'évaluation, la certification est délivrée selon les performances du bâtiment. Les GBRS ont une variété de niveaux de certification (Annexe K), allant de quatre niveaux pour LEED, Green Mark et GPRS à six niveaux pour Green Star et GSAS et avec des scores différents pour un même niveau de certification. A titre exemple, un bâtiment qui a une certification « Gold » ne peut obtenir qu'une note « Performant » dans un autre système. Selon l'échelle des niveaux de certifications, la limite inférieure représente le prérequis de projet pour être certifié. A titre d'exemple, sur l'échelle de 100, la limite inférieure du système BREEAM est 30 pour être certifié « Pass », mais le système singapourien Green Mark, a une limite inférieure égale à 40. Cela confirme, le manque de la standardisation des certifications dans le secteur du bâtiment.

1.5. Une critique des référentiels existants des bâtiments verts

De nombreux référentiels ont été développé depuis les années 1990, tant dans les pays développés et que des pays en développement, pour s'adapter aux spécificités de chaque pays. Au cours de cette revue de la littérature, nous avons mis en évidences les limites des référentiels existants selon les points clés suivants.

1.5.1. Variation régionale

L'adaptation des référentiels internationaux existants pour des régions spécifiques devient importante pour une évaluation fiable [98]. Ils se basent sur des normes et des critères généraux qui ne tiennent pas toujours compte des spécificités régionales, culturelles ou climatiques. Ce manque de

contextualisation peut rendre certains critères moins pertinents ou difficiles à atteindre dans certaines régions ou pays. Les différences réglementaires et les priorités accordées aux défis locaux dans différentes parties du monde constituent les difficultés les plus courantes auxquelles sont confrontées les référentiels internationaux pour s'appliquer à l'échelle mondiale. A tire d'exemple, le critère Tra 03b. « Alternative modes of transport » du référentiel LEED, évalue la présence d'un espace de recharge pour véhicules électriques qui loin d'être applicable au site du bâtiment résidentiel au Maroc.

1.5.2. Prise en compte du développement durable

D'après les résultats de l'étude comparative précédente et d'autre recherches similaires ([66][77][103]) ont démontré que les GBRS existants se concentrent principalement sur les performances environnementales et dans une moindre mesure sur les deux autres piliers principaux du développement durable : l'économie et le social (Figure 38). En réalité, comme le souligne Ferreira *et al*. (2023)[197], les GBRS ont axé sur le pilier de l'environnement ne doivent pas être confondus avec les systèmes d'évaluation de la durabilité. En effet, l'obtention d'une certification « Bâtiment vert » ne signifie pas nécessairement que le bâtiment a réussi à atteindre des performances aux deux piliers social et économique.

L'une des solutions, qui peut remédier à cette limitation, consiste à impliquer une approche holistique, qui se base sur les trois dimensions de la durabilité pour évaluer la performance de durabilité, comme le proposent les auteurs de l'étude Liang *et al*. (2021)[198] d'établir une deuxième génération des GBRS avec une attention égale aux trois piliers de durabilité.

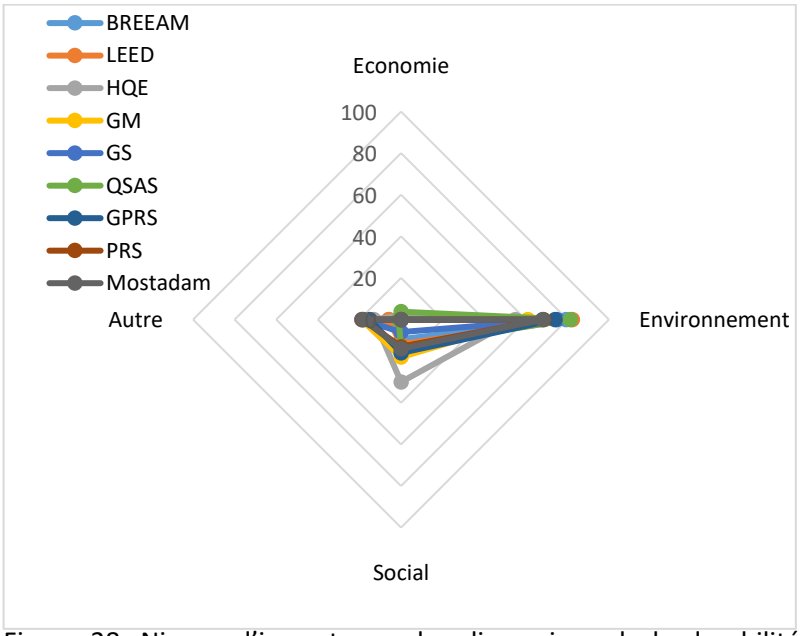


Figure 38: Niveau d'importance des dimensions de la durabilité dans les neuf GBRS (Source : Auteur,2023)

1.5.3. Critères d'évaluation

Les critères d'évaluation sont très importants pendant le processus de l'évaluation des projets du bâtiment. Ils doivent être clairs, réalisables, mesurables et refléter les priorités des défis locaux [167]. Cela suggère que le nombre et le type d'indicateurs qualitatifs ou quantitatifs dépendent de la disponibilité des données locales et des méthodes de calcul. Les seuils de performance des critères d'évaluation doivent s'adapter selon les exigences locales et la réglementation appliquée dans un contexte spécifique [188]. Prenons l'exemple de trois bâtiments de conception et de fonctionnement

similaires situés dans trois conditions climatiques différentes qui doivent être évaluées. Bâtiment (A) : situé en climat chaud et aride (Er-Rachidia) ; bâtiment (B) : situé en climat montagnard (Ifrane) et bâtiment(C) : situé dans le climat méditerranéen (Tanger). Il semble que ces bâtiments se voient attribuer des crédits similaires par les référentiels internationaux, car ils intègrent exactement les mêmes critères d'évaluation. Pourtant, le bâtiment (A) connaît des conditions extrêmement froides en hiver et chaudes et sèches en été, avec un ciel dégagé presque toute l'année. Cela rend la situation très difficile aux concepteurs du bâtiment pour surmonter les conditions des surchauffes difficiles. Au-delà, un potentiel important d'implanter des panneaux solaires ou thermiques. Cependant, la région du nord du Maroc est caractérisée par une forte humidité qui impacte la qualité de l'environnement intérieur du bâtiment (C). Donc, on propose la prise en considération de cette variété régionale du Maroc en termes du climat, des ressources naturelles et la proximité géographique à la chaîne logistique des matériaux de construction. Il est donc important que les critères d'évaluation soient plus flexibles selon les conditions régionales du territoire marocain.

1.5.4. Système de pondération

Un système de pondération représente un moyen de gérer la priorité de critères d'évaluation, les GBRS utilisent différentes méthodes de pondération, par exemple, BREEAM utilise un système de pondération qui donne l'importance aux certaines catégories, alors que les deux référentiels LEED et HQE priorisent des critères et des catégories par les points possibles de chaque critère ou catégorie. Pour développer une nouvelle méthode d'évaluation, il est important de personnaliser le système de pondération afin qu'il puisse répondre aux priorités du Maroc.

1.6. Quelle alternative pour le Maroc ?

Bien que le Maroc applique les référentiels internationaux (HQE, LEED et BREEAM) qui ne sont pas parfaitement adapté au contexte local et manque des catégories liées aux deux piliers économique et social. Cela, il a été confirmé par les réponses de 50 % des 167 participants du premier questionnaire ; en répondant la question : Est-ce que vous êtes d'accord avec l'affirmation d'Haapio en 2008 [199] « les systèmes de certification ont un fort lien avec leur région, ils dépendent des normes nationales, de patrimoine culturel et des conditions climatiques », alors que 39 % sont neutres. De plus les systèmes de certification internationale peuvent avoir des coûts élevés, tant en termes de frais de certification que de processus de documentation et de collecte de données. Les dépenses moyennes de certification LEED v4 BD+C: New Construction pour un bâtiment résidentiel de 100 m² coûte environ 50000 MAD. Cela rend l'accès à la certification plus difficile pour les petits acteurs du secteur du bâtiment, en particulier dans les pays en développement.

1.7. Résumé

Le schéma général des systèmes GBRS comprend des catégories et des critères pour évaluer les différents types des bâtiments, de la phase de conception à l'occupation. Après avoir examiné la revue de littérature de développement des GBRS dans les pays développés et en développement, tels que HQE, LEED, Mostadam et d'autres, une attention particulière a été accordée au l'évolution des catégories d'évaluation au fil des versions de chaque GBRS, en mettant l'accent sur les similitudes, les différences et la hiérarchisation des référentiels et leur méthodologie de notation. Les critères d'évaluation, les méthodologies de calcul et les processus de certification varient d'un système à l'autre, ce qui nécessite une compréhension approfondie des spécificités de chaque référentiel. Cela met en évidence la problématique de standardisation des critères d'évaluation entre les GBRS. Nous avons souligné certaines limites et lacunes observées dans les référentiels existants. Parmi les critiques abordées, la focalisation excessive sur le pilier environnement, le manque de contextualisation régionale, l'adaptabilité des seuils de performance au contexte marocain, ainsi que les frais élevés associés à la certification.

Ces résultats justifient la nécessité de développer un nouveau référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments adapté au contexte marocain. Il devrait être développé de manière à surmonter les lacunes des systèmes de certification existants.

CHAPITRE 2 : Développement d'un référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments résidentiels

2.1. Introduction

Les chercheurs sont impliqués dans le développement de nouveaux référentiels d'évaluation des bâtiments verts adaptés aux besoins spécifiques d'une région ou d'un pays. Ali et *al.* (2009) [16] ont développé un outil d'évaluation des bâtiments spécifique à la Jordanie (SABA) sur la base de 7 catégories et 42 critères d'évaluation. Alyami *et al*.(2013,2015)[70],[71] ont élaboré un système d'évaluation des bâtiments résidentiels adapté à l'Arabie Saoudite. En Afrique, Olawumi et *al.*(2020) [200] ont développé un référentiel régional de l'Afrique subsaharienne pour les bâtiments neufs et existants. De même, Assefa et *al.* (2023) ont développé un cadre d'évaluation générique des bâtiments en Ethiopie, comprenant 7 catégories environnementales, une catégorie d'économie et deux catégories sociales. Alors que l'étude Khan et *al.* (2021)[32] a pris en considération deux autres piliers de durabilité, à savoir la culture et la gouvernance pour évaluer les bâtiments au Pakistan. Bansal et *al.* (2019)[201] ont élargi l'évaluation la performance environnementale intégrant les catégories de la résilience des bâtiments contre les vulnérabilités d'inondation et du glissement de terrain, spécifiquement dans le contexte de l'Inde.

Le présent chapitre a pour objectif de développer le référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments résidentiels adapté au contexte national, que nous désignons sous le nom de « *Building Sustainability Assessment Framework »* : BuSAF. Ce référentiel d'évaluation est basé sur les recommandations du chapitre précédent pour élaborer une deuxième génération de GBRS qui se base sur les trois piliers de développement durable. À cette fin, la démarche s'appuiera sur l'obtention d'un consensus auprès d'un panel d'experts en « bâtiment vert » utilisant la technique Delphi. Nous hiérarchiserons le pilier environnemental (BuSAF(Env)) en sous-catégories et élaborons des fiches descriptives pour chaque critère d'évaluation pour les bâtiments résidentiels au contexte du Maroc.

2.2. Modèle conceptuel de BuSAF

Le développement du référentiel BuSAF implique des recherches empiriques. Tout d'abord, nous nous sommes basés sur l'état de l'art des méthodes utilisées par les études ([16]; [202]; [203];[176];[204]) et l'étude Nizar and Chithra (2020)[76]. De plus, le guide d'assurance qualité pour le développement des GBRS publié par WorldGBC [205] et les deux normes ISO 21678:2020 « Développement durable dans les bâtiments » et ISO21931-1 :2011/2022« Cadre méthodologique de l'évaluation au sens du développement durable des performances » (Etape 0).

Le modèle conceptuel du référentiel BuSAF présenté dans la figure 39. Il se base sur cinq niveaux :

- Niveau 1 : La performance globale de la durabilité ;
- Niveau 2 : Les trois piliers de développement durable (TBL);

- Niveau 3 : Les catégories d'évaluation ;
- Niveau 4 : Les sous-catégories d'évaluation ;
- Niveau 5 : Les critères d'évaluation.

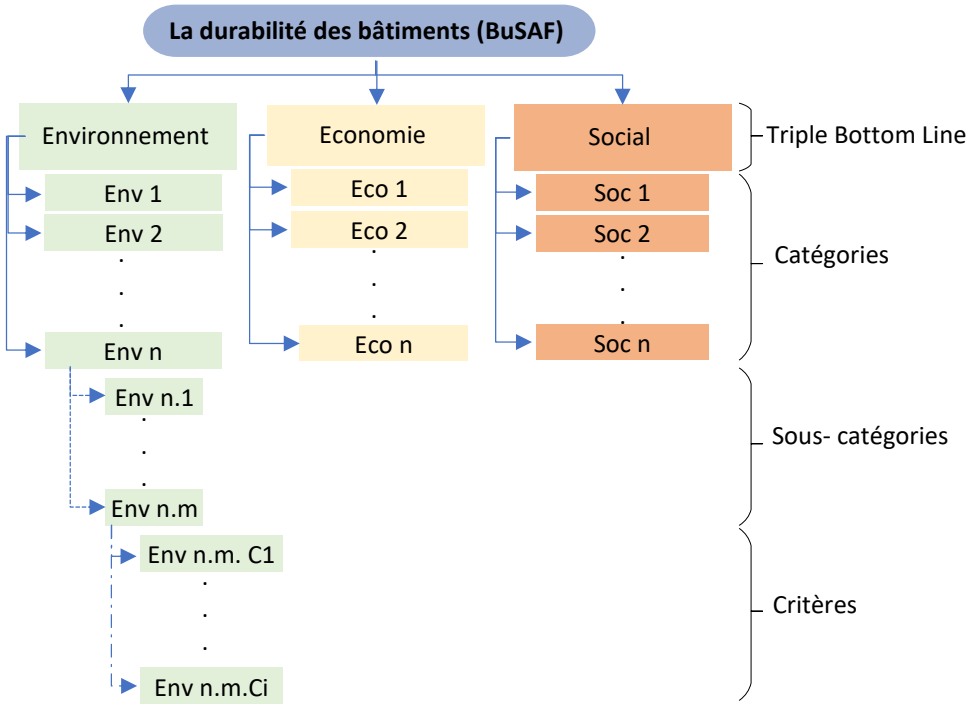


Figure 39: Cadre conceptuel du référentiel d'évaluation BuSAF (Source : Auteur,2023)

Le périmètre temporelle du référentiel BuSAF a été déterminé selon des réponses recueillies du questionnaire B.1 de l'annexe (H) concernant l'importance de chaque phase du cycle de vie du bâtiment sur la performance de trois piliers de la durabilité (Environnement, économie et social).

Les aspects environnementaux et socioéconomiques varient entre important (3.40) et très important (3.95) dans les trois premiers cycles de vie des bâtiments : Conception, construction et opération. Les performances de la phase de démolition du bâtiment ont moins d'importance, ce qui peut s'expliqué par l'absence des filières de valorisation des déchets de démolition au Maroc (Figure 40).

Le cadre conceptuel de BuSAF basé sur une analyse hiérarchique multicritère utilise une approche descendante pour évaluer les performances de la durabilité. Les trois piliers du développement durable ont été hiérarchisés en catégories de performance, chaque catégorie d'impact déterminée par l'agrégation d'un ensemble de sous-catégories et chaque sous-catégorie hiérarchisée en critères d'évaluation. Les critères sont les plus petites unités d'évaluation de la durabilité (Figure 39).

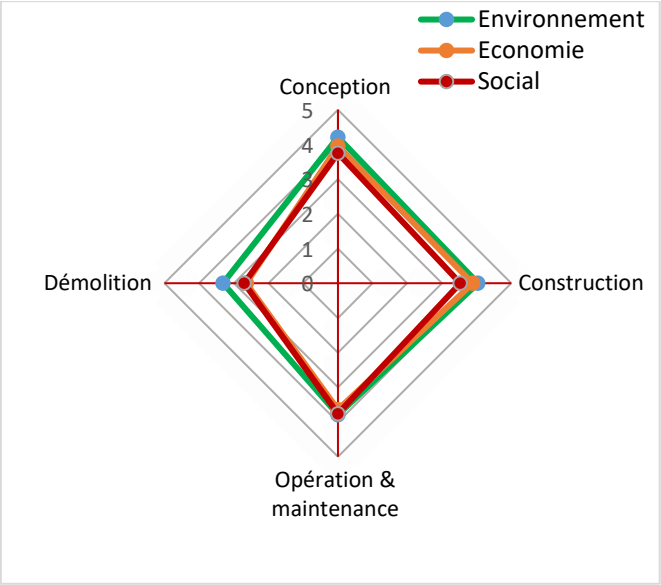


Figure 40: Importance les TBL selon les phases de vie du bâtiment (Source : Auteur,2023)

2.3. Cadre méthodologique

Pour ce chapitre, nous avons suivi le modèle méthodologique de la figure 41 qui comprend cinq étapes clés suivantes :

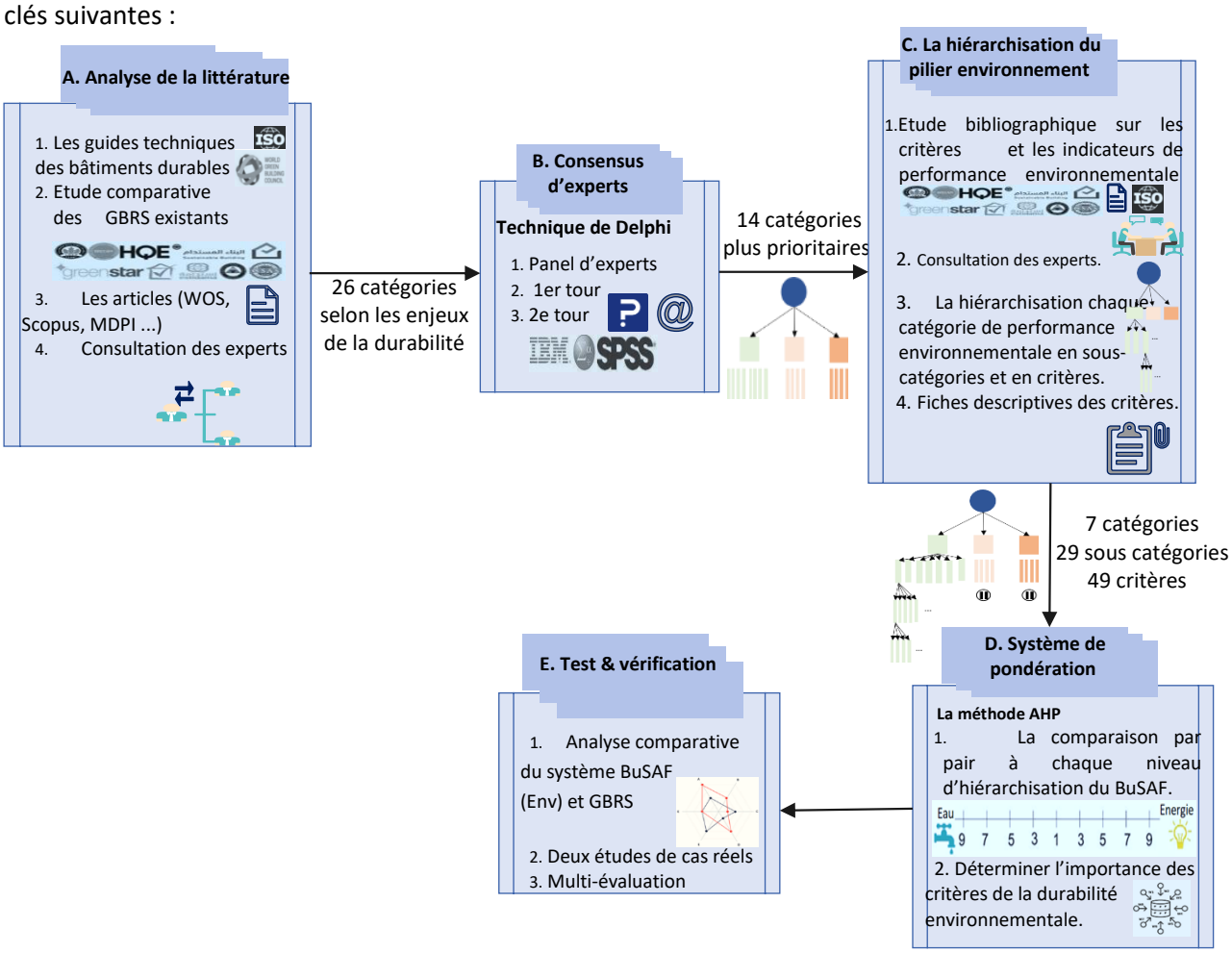


Figure 41: Approche méthodologique de l'élaboration du référentiel BuSAF (Source : Auteur,2023)

2.3.1. Etape (A) : Analyse de la littérature

Tout d'abord, une analyse rigoureuse de la littérature a été menée pour compiler une liste préliminaire des catégories à partir de neuf GBRS sélectionnés (cf. chapitre 1).

Tableau 19: Inventaire des catégories d'évaluation des GBRS_résidentiel (Source : Auteur,2023)

BREEAM new construction international	**LEED 4.1 residential BD+C multifamily**	**Green Mark residential new Buildings version 4.0**	**Green Star Design and As Built V1.2**
Energie, eau, transport, matériaux, déchets, utilisation des sols et écologie, pollution, innovation, management, santé et bien-être	Site durable, énergie et atmosphère, localisation et transport, efficacité de l'eau, matériaux et ressources, qualité de l'environnement intérieur, processus intégratif, priorité régionale et innovation	Efficacité énergétique, efficacité de l'eau, protection de l'environnement, qualité de l'environnement intérieur et caractéristiques écologiques	Energie, transport, eau, matériaux, utilisation des sols et écologie, management, qualité de l'environnement intérieur, émissions et innovation
GPRS_V.1 New construction	**Mostadam for Residential Buildings D+C**	**PRS : Design & Construction**	**QSAS Residential Buildings**
Site durable, efficacité énergétique, efficacité de l'eau, matériaux et ressources, management, qualité de l'environnement intérieur et innovation	Durabilité du site, transport et connectivité, énergie, eau, santé et confort, matériaux et déchets et culture, éducation et innovation et gestion et maintenance	Systèmes naturels, énergie, eau, bâtiments habitables, gestion des matériaux, processus de développement intégré et pratiques innovantes	Site, connectivité urbaine Energie, eau, matériaux, environnement intérieur, valeur culturelle et économique, gestion et opérations
HQE_bâtiment résidentiel (V2015)			
Cibles : site, composants, chantier énergie, eau, déchets, entretien – maintenance, confort hygrothermique, confort acoustique, confort visuel, confort olfactif, qualité des espaces, qualité de l'air et qualité de l'eau.			

Douze catégories ont été prises en compte par les neuf GBRS sélectionnés type bâtiment résidentiel (Tableau 19) : Site durable, énergie, eau, matériaux, qualité de l'environnement intérieur et innovation étaient les catégories dominantes. On note que des catégories d'un référentiel peuvent être utilisées comme un critère ou indicateur pour les autres référentiels. Par exemple : la catégorie de la gestion des déchets dans le référentiel BREEAM a été classée comme un critère dans LEED, alors que le GPRS, GSAS, PRS et Mostadam l'ont introduit dans la catégorie « Management/gestion ». Nous complétons le modèle conceptuel du BuSAF par la famille de la norme EN 15643 (2,3 et 4) « Evaluation de la performance environnementale, sociale et économique des bâtiments » et des études similaires ([206]–[212]) dans les pays en développement (Jordanie, Égypte et l'Arabie saoudite) qui présentent des similitudes avec le Maroc. Après un entretien avec deux experts des bâtiments verts au Maroc, nous avons finalisé la liste des catégories (Tableau 20), pour appliquer la technique de consensus.

Tableau 20: Liste préliminaire des catégories d'évaluation (Source : Auteur,2023)

Environnement	Economie	Social
Sélection du site	Coût du cycle de vie (LCC)	Santé et bien être
Aménagement du site	Abordabilité	Sécurité et sûreté
Efficacité énergétique	Flexibilité	Héritage architectural
Matériaux de construction	Temps de construction	Proximité des services
Eau	Gestion intégrée	Habitabilité sociale
Gestion des déchets	Investissement	Ethique et équité
Gestion des risques		Fonctionnalité et facilité de gestion
Pollution		Mangement et documentation
Transport alternatif		Accessibilité
Impacts sur le paysage		Innovation verte

2.3.2. Etape (B) : Consensus d'experts

Deuxièmement, la consultation d'un panel d'experts est cruciale pour recueillir des opinions d'experts sur la liste des catégories d'évaluation de la durabilité des bâtiments [190][191]. Nous citons trois techniques de prise de jugement par consensus, comme suit :

- Le consensus basé sur l'enquête : un moyen de communication fondé sur un questionnaire entre les groupes d'experts pour examiner leurs propositions et parvenir une décision consensuelle (comme la technique Delphi).
- Le consensus basé sur les réunions : les réunions de groupe offrent l'opportunité au groupe de générer et de discuter des idées face à face, afin de parvenir à un consensus. Cette catégorie comprend de nombreuses techniques telles que le Brainstorming, focus group et la Technique du Groupe Nominal (NGT) [213]–[215].
- Le consensus basé sur la synthèse de données et réunions : cette méthode combine l'approche par questionnaire avec des jugements collectifs d'experts. La méthode d'adéquation RAND/UCLA Appropriateness est la plus utilisée.

Nous avons comparé les trois méthodes : Delphi, NGT et RAND/UCLA. Cette comparaison est basée sur 14 caractéristiques établies par Llyod *et al.* (2011)[215]. La technique Delphi était la meilleure technique (Tableau 21), atteignant 70.60 % de compatibilité totale avec les critères, tandis que RAND/UCLA arrivait en deuxième position avec 41.20 %, suivi de 29.40 % pour la NGT.

Tableau 21: Comparaison les techniques de consensus (Source : Auteur,2023)

Caractéristiques		Techniques de consensus		
		Delphi	NGT	RAND/UCLA
Sondage par courriel		✓	×	◐
Décisions privées déterminées avant la discussion du groupe		×	×	✓
Anonyme		✓	×	×
Itération de tours		✓	×	◐
Limite le déplacement		✓	×	×
Éviter les contacts face à face		✓	×	×
Interaction structurée		◐	✓	✓
Intégrer des preuves		×	×	✓
Générer un grand nombre d'idées		✓	◐	✓
Éviter les prises de décisions rapides		✓	◐	✓
Rétroaction formelle contrôlée		✓	✓	✓
Mesure l'importance des idées générées		✓	◐	✓
Rapidité		×	✓	×
Economie de temps		×	✓	×
Pourcentage d'inclusion des caractéristiques	✓	70.60 %	41.20 %	29.40 %
	◐	5.90 %	17.60 %	11.80 %
	×	23.50 %	41.20 %	58.80 %
Legendre : ✓ Applicable ; ◐ semi-applicable ; × Non applicable				

Les résultats de la comparaison révèlent deux caractéristiques qui font de Delphi la meilleure technique : « Anonyme » et « Eviter des contacts en face-à-face ». La caractéristique « Limite de déplacement », est importante lorsqu'un consensus entre un grand nombre de participants est nécessaire et qui ne peuvent pas se réunir simultanément pour des raisons de la disponibilité des experts et de la crise sanitaire (COVID 19).

2.3.3. Etape (C) : Hiérarchisation des catégories environnementales du référentiel BuSAF

Dans la présente thèse, nous hiérarchisons les catégories du pilier « Environnemental » qu'après les résultats de la technique Delphi. Les catégories du pilier économique et social seront réalisées dans un autre cadre au futur. Nous avons suivi la même démarche que lors de la première étape (A), on se base sur les GBRS existants, la littérature et la liste des indicateurs de la norme internationale ISO 21929-1 :2011 (développement des indicateurs)[216]. Chaque catégorie environnementale a été hiérarchisée en sous-catégories et des critères d'évaluation de performance. Après cela, une discussion avec les 2 experts pour finaliser les critères d'évaluation BuSAF(Env) selon les conditions locales du Maroc. Par la suite, des fiches descriptives ont été élaborées pour chaque critère d'évaluation.

2.3.4. Etape (D) : Etablir un système de pondération

Dans la quatrième étape, nous réalisons un système de pondération, qui reflète les priorités des catégories et des sous-catégories du BuSAF(Env) dans le contexte du Maroc. Les méthodes de prise de décisions multicritères utilisées dans des études de pondération des systèmes à multicritères. Les deux

méthodes la Hiérarchie Analytique Procédé (AHP) et la Technique de l'Ordre de Préférence par la Similarité avec la Solution Idéale (TOPSIS) ont été employées dans différentes études telles que : [213]–[215]. Outre AHP et TOPSIS, il existe un nombre important des méthodes MCDM, à savoir ANP, ELECTRE et PROMETHEE. AHP décompose un problème MCDM en une structure hiérarchique en supposant que les relations de critères à différents niveaux sont indépendantes. Dans la pratique, les experts peuvent rencontrer des difficultés de comparer l'importance des items plus précisément [217]. AHP peut être critiqué en termes des jugements subjectifs [218]. De plus, il manque de sensibilité à l'incertitude du modèle de décision. Par conséquent, les méthodologies susmentionnées à elles seules ne peuvent pas être suffisantes pour traiter le flou des jugements humains qui sont en même temps subjectifs [196][197].

À ce jour, aucune technique n'a été acceptée comme offrant des résultats précis et une méthode meilleure que les autres. À cet égard, cette étude propose d'utiliser l'AHP pour pondérer les éléments d'évaluation d'un référentiel d'évaluation multicritère.

2.3.5. Etape (E) : Application et Test

Enfin, nous testons le référentiel BuSAF(Env) sur deux maisons marocaines modernes et en comparant les résultats avec une multi-évaluation par trois référentiels internationaux, pour montrer l'applicabilité du référentiel BuSAF(Env) proposé, ainsi que sa cohérence avec les principaux référentiels internationaux.

2.4. Identifier les catégories du référentiel BuSAF

2.4.1. Présentation de la méthode Delphi

La technique Delphi est structurée selon l'approche proposée par Miller *et al.* (2001)[220] et Mukherjee *et al*. (2015)[221] et se déroule selon les étapes présentées dans la figure 42. En général, la première phase poursuit quatre objectifs différents : (1) définition des objectifs, (2) définition du format Delphi, (3) définition des questions et (4) pré-test.

2.4.1.1 Phase 1 : Préparation de l'étude Delphi

- Conception de l'enquête Delphi

Le questionnaire (B1) de Delphi a été conçu initialement par 26 catégories (Tableau 20). Les experts interrogés ont évalué leurs opinions sur une échelle de notation de type Likert à 5 points, classée de « Pas du tout important » à « Extrêmement important ». De plus, un pré-test a été effectué avec deux enseignants-chercheurs et un expert, leurs commentaires ont été utilisés pour améliorer la qualité et la clarté du questionnaire. Ce questionnaire s'est déroulé en deux tours. Chaque tour a commencé par une notification et un lien vers le questionnaire envoyé par courriel aux participants. Après le premier tour, seuls les panélistes ayant participé ont été invités à participer au tour suivant. Environ 6 semaines ont été allouées aux experts pour terminer chaque cycle. Les panélistes devaient fournir des

informations professionnelles (organisations, professions et des années d'expérience) et une adresse électronique à la fin de questionnaire. Le questionnaire (B1) comprenait une série de trois sections traitant des catégories environnementales, sociales et économiques applicables aux bâtiments résidentiels marocains. A la fin de chaque section, nous demandons aux participants de suggérer d'autres catégories.

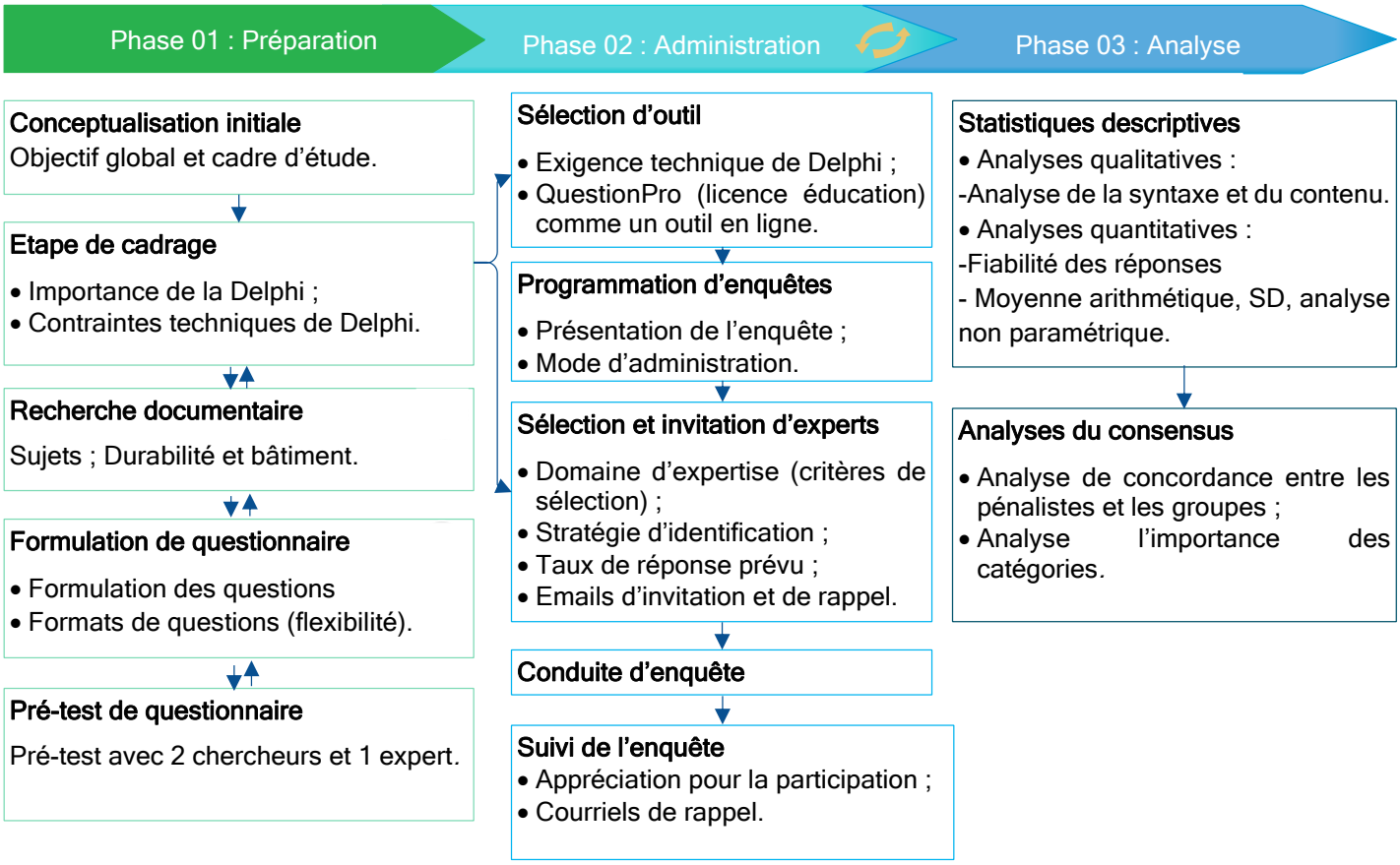


Figure 42: Approche de la méthode Delphi (Source : Auteur,2023)

2.4.1.2 Phase 2 : Administration du questionnaire Delphi

- Processus de sélection des experts

Le choix d'experts compétents possédant une expérience considérable ainsi que des qualifications professionnelles doivent être l'objectif principal ainsi que la taille d'échantillon [181]. Les participants potentiels à l'enquête ont été identifiés à partir de l'échantillon du questionnaire A, tels que les architectes, ingénieurs, entrepreneurs, des universitaires, les référents marocains des systèmes HQE, LEED, BREEAM et les membres de l'association marocaine des bâtiments verts et de nos réseaux professionnels, en parcourant les listes de conférences (IRSEC), webinaires et les évènements en relation avec la thématique (salon Pollutec). Tous les contacts ont été tabulés, avec des informations sur le nom, la position, les coordonnées, s'ils ont ou non retourné le questionnaire et des commentaires généraux. L'annexe (L) résume les organisations et les instituts publics ou privés

consultés pour sélectionner les experts du panel. Nous avons sélectionné plus de 400 panélistes issus des différentes parties, selon les conditions suivantes :

- Être nationalité marocaine au moins de 1 an d'expérience dans la construction durable ou des experts étrangers plus de 3 ans d'expérience au Maroc.
- Avoir une contribution sur le développement durable dans le secteur comme les clusters au Maroc (EMC/Energie) et les fédérations professionnelles.
- Pour les enseignants-chercheurs, avoir au moins une publication dans le domaine bâtiment durable (efficacité énergétique, écoconception,…).

➢ Processus de collecte de données

Les deux questionnaires de Delphi sont administrés en utilisant le lien suivant pour le premier tour : https ://questionpro.com/t/AQVJ2ZkT44 et en deuxième tour : https ://questionpro.com/t/AQVJ2ZmYwn nous permettant de collecter l'ensemble des données en 4 mois. Le premier tour a été basé sur un processus de brainstorming. Les experts ont été invités à évaluer la pertinence des catégories qui sont applicables au contexte du Maroc sur une échelle de Likert en cinq points par un courriel d'invitation (Annexe M). A la fin du premier tour, plusieurs étapes ont été franchies pour préparer le second tour, notamment : l'analyse statistique des résultats, la consolidation des commentaires des panélistes pour éliminer les doublons. A partir les catégories suggérées par les panélistes, nous avons ajouté 3 nouvelles catégories qui seront évaluées lors du cycle suivant. Le deuxième tour permettra au panel d'experts de visualiser toutes les autres réponses anonymes et de fournir des commentaires sur chaque catégorie du premier tour. Il a été réalisé en fournissant la valeur moyenne ($\bar{x}$) de chaque catégorie, ce qui leur donne la possibilité de réviser leurs jugements précédents.

2.4.1.3 Phase 3 : Traitement des données

A la fin, les données collectées ont suivi une série d'analyses statistiques selon la hiérarchisation visualisée dans un logigramme (Figure 43) :

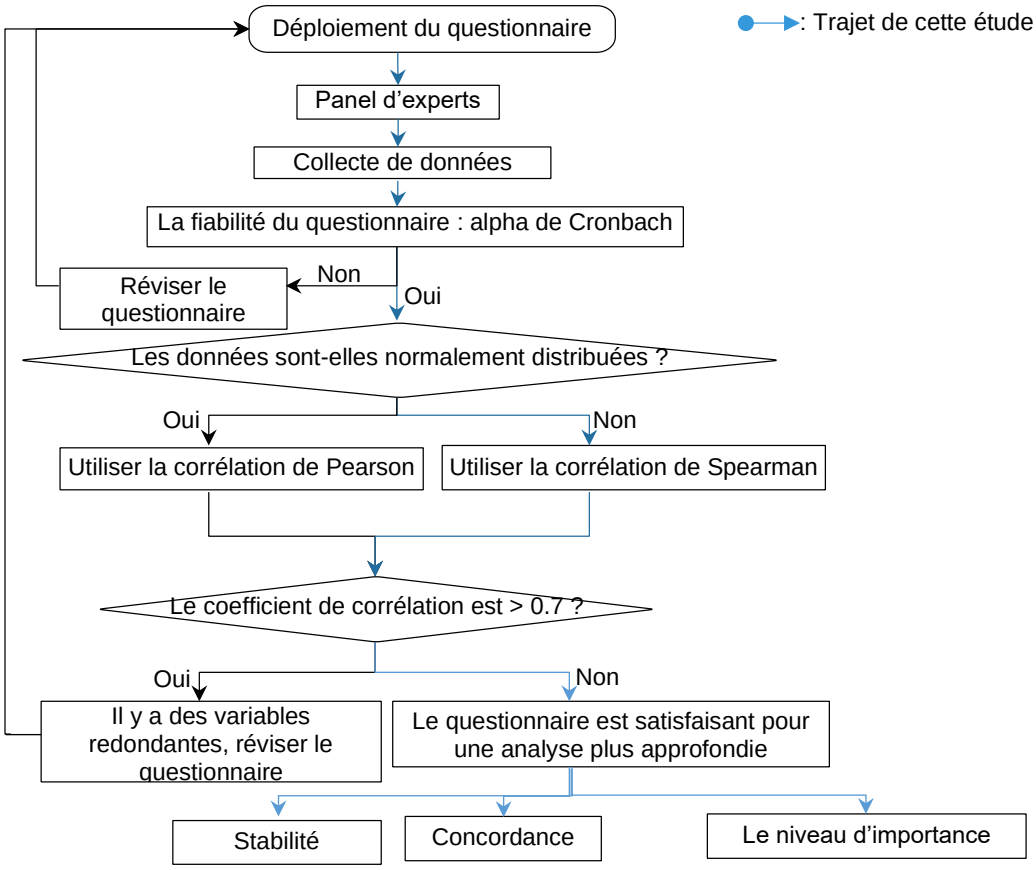


Figure 43 : Hiérarchisée les étapes d'analyse des données pendant les deux tours de Delphi (Source : Auteur,2023)

2.4.1.4 Test de fiabilité et de normalité

Le test de fiabilité α de Cronbach a été utilisé comme le cas du questionnaire A pour évaluer la fiabilité des données récupérées pendant les deux tours de Delphi. De plus, le test de normalité de Shapiro-Wilk a été effectué pour déterminer le type de la distribution des données.

2.4.1.5 Consensus et stabilité

De nombreuses études Delphi ont utilisé des critères subjectifs ou de statistique descriptive pour déterminer le niveau de consensus. Von der Gracht (2012)[222] a classé en trois grandes familles des critères d'arrêt des tours de la méthode Delphi : subjectif, statistique descriptive (mode, moyenne/médiane, écart-type et intervalle interquartile) et l'inférence statistique (coefficient de variation, coefficient de corrélation de Spearman, statistiques t et tests F etc.). Ces mesures permettent d'évaluer la dispersion des réponses des experts et de déterminer s'il existe un consensus suffisant pour conclure le processus de consensus. La moyenne peut être utilisée pour évaluer la tendance centrale des réponses des experts. Alors que la médiane est une mesure de tendance centrale robuste aux valeurs extrêmes. Si la moyenne ou la médiane des réponses se stabilise et ne varie pas de manière significative, cela peut suggérer un consensus entre les experts. Aussi bien, des combinaisons entre les mesures statiques comme l'écart type et interquartiles pour se faire. La

moyenne et l'écart type sont appropriés lorsque les données sont distribuées de manière normale ou approximativement normale et lorsque la taille de l'échantillon supérieure à 30. Cela peut se combiner dans le calcul du coefficient de variation (CV) est utilisé pour évaluer la dispersion relative des données par rapport à leur moyenne et l'intervalle interquartile est utile pour évaluer la dispersion des réponses des experts à travers les tours. Ces mesures, parfois ont été choisies de manière assez arbitraire. Alyami *et al.* (2013)[70] ont utilisé la médiane et l'intervalle interquartile comme critère d'arrêt le processus de Delphi avec 33 experts. Cependant, Aldossary *et al.* (2015)[223] ont utilisé la moyenne et l'intervalle interquartile plutôt que la moyenne et l'écart type avec 40 experts. Akhanova *et al.* (2020)[224] ont appliqué la moyenne et l'écart type pour un panel d'experts composé de 21 membres. Grover *et al*.(2020)[225] ont ajouté que le troisième cycle n'augmenterait pas significativement le consensus entre les membres du panel. D'autres situations ; contraints du temps et le rapport coût/bénéfice pourront arrêter les tours de Delphi sans utiliser la stabilité et le consensus comme critères d'arrêt. Alors, dans la présente étude, comme l'échantillon est supérieur à 30 experts avec des données qui ne suivent pas une distribution normale, on utilise la moyenne et l'intervalle interquartile (IQR). Rayens *et al.* (2000)[226] considère qu'un IQR de 20 % de l'échelle de notation est acceptable pour le consensus ; par conséquent, un IQR de 1 juge comme un bon consensus sur une échelle de Likert à 5 points dans cette étude. Alors que, le CV être utilisé pour évaluer la dispersion des réponses des experts à travers les tours successifs. Une diminution du CV au fil des tours peut indiquer un consensus croissant entre les experts. L'étude de English *et al.* (1976)[227] ont publié les règles suivantes sur la façon d'interpréter le coefficient de variation pour la mesure du consensus (Tableau 22).

Tableau 22 : Coefficient CV et le niveau de consensus [227]

Coefficient de variation	**La décision**
0<CV ≤ 0.5	Bon degré de consensus, pas besoin de tour supplémentaire
0.5 <CV≤0.8	Degré de consensus moins que satisfaisant, besoin éventuel d'un tour supplémentaire
CV> 0.8	Faible degré de consensus. Besoin certain d'un tour supplémentaire

2.4.1.6 La mesure du niveau d'accord

Des tests non paramétriques ont été utilisés pour traiter les données qui ne suivent pas une distribution normale pour mesurer le niveau de l'accord entre les sous-groupes de l'échantillon de l'étude de Delphi et les membres de même groupe.

a) Concordance de Kendall w :

En rappel, c'est un test non paramétrique utilisé pour mesurer le degré de concordance ou d'accord entre plusieurs évaluateurs. Un score élevé de Kendall indique un niveau élevé d'accord entre les membres du panel. En outre, Olawumi *et al*. (2019)[228] ont fait valoir qu'il est difficile d'obtenir une

valeur W plus élevée avec une augmentation du nombre des répondants. Par conséquent, une augmentation de la valeur W à travers les tours a été davantage prise en compte. De plus, le test du chi carré (χ^2) qui indépendamment de la taille de l'échantillon a été utilisé.

b) Test d'indépendance du Chi carré (χ^2) :

C'est un test non paramétrique par lequel on peut évaluer s'il existe une relation entre deux variables nominales ou ordinales. Olawumi *et al*. (2019)[228] a proposé ce test pour vérifier la stabilité des réponses entre les tours de Delphi. Ce test du chi carré pour déterminer s'il existe une association significative entre les réponses des experts.

c) Validation de l'accord des experts :

L'examen de la littérature sur la mesure du consensus a révélé que les chercheurs ont utilisé l'évaluation de la concordance inter-juges (IRA). Brown *et al*. (2005)[229] a défini le terme l'IRA comme « le degré d'accord entre deux ou plusieurs évaluateurs qui suivent la même procédure ». L'avantage de cette méthode n'est pas limité, en compte la dépendance des données à l'échelle et à la taille de l'échantillon. Cette technique utilisée dans cette étude pour :

- Etudier le niveau de concordance entre les experts pendant les deux tours pour chaque catégorie d'évaluation ;
- Valider l'accord obtenu par le test de Kendall w et l'analyse du Chi carré (χ^2).

Nous nous basons sur l'étude bibliographie de O'Neill *et al.* (2017)[230] qui compare sept méthodes de calcul d'IRA. Après que nous avons examiné les forces et les faiblesses de chaque méthode, le choix s'est fixé sur l'équation (Eq.1) développé par Brown *et al.* En 2005 [229]. Les niveaux d'accords entre les membres des groupes ont été déduit selon la valeur de $a_{wg\,(1)}$, comme suite : 0.00-0.30 « Manque d'accord », 0.31-0.50 « Accord faible », 0.51-0.70 « Accord modéré », 0.71-0.90 « Accord fort » et 0.91 à 1.00 « Accord très fort» [231]. Cependant, l'équation (Eq.1) ne peut pas calculer la concordance des moyennes au-delà de deux limites d'une échelle de Likert (1 et 5). Par conséquent, les deux équations (Eq.2) et (Eq.3) ont aidé à déterminer la limite supérieure et inférieure lors du calcul

d'$a_{wg\,(1)}$: $$a_{wg(1)} = 1 - \frac{2\times SD^2}{((A+B)M - M^2 - A\times B))\times \frac{n}{n-1}}$$ Eq. 1

$$M_{lower} = \frac{B(n-1)+A}{n}$$ Eq. 2 ; $$M_{supper} = \frac{A(n-1)+B}{n}$$ Eq. 3

Où :SD=écart-type, A=valeur d'échelle maximale (c'est-à-dire 5), B=valeur d'échelle minimale (B=1), M=valeur moyenne de catégorie, n=taille de l'échantillon de répondants.

Les limites moyennes pour les deux tours de l'enquête Delphi, à savoir M_{lower} et M_{upper}, sont respectivement présentées dans le tableau 23.

Tableau 23 : Valeurs limite de l'équation d'IRA

	Round 1 (n=100)	**Round 2 (n=78)**
Ms_{upper}	4.97	4.95
M_{lower}	1.04	1.05

Toutes les valeurs des moyennes des catégories jugées pendant les deux tours (Tableau 26 et Annexe O) sont comprises entre les deux limites M_{lower} et M_{supper}. Donc on peut appliquer l'équation 1.

2.4.2. Résultats et discussions

2.4.2.1 Panel d'experts

Sur les 400 panélistes potentiels initialement invités à participer à l'enquête Delphi, cent questionnaires ont été remplis correctement pendant le premier tour et 78 pendant le deuxième tour. Ces chiffres sont tout à fait suffisants, la taille de l'échantillon n'est pas nécessaire pour de telles techniques et de nombreuses études avaient une taille d'échantillon de 15 à plus de 120 experts [232]. Les participants étaient affiliés à divers types d'organisation, tels que les cabinets d'architecture, les bureaux d'ingénierie et consulting, les entrepreneurs, les services des ministères et les établissements universitaires. Un certain nombre de répondants avaient des compétences dans deux domaines ou même plus. De plus, les participants à l'enquête pendant le premier tour ont eu différentes d'années d'expérience professionnelle, allant de 3 ans (ou moins) à plus de 20 ans. Moins de 20 % des répondants étaient des jeunes dans le domaine de la construction durable avec moins de 3 ans d'expertise. Alors que 40 % des répondants avaient entre 4 et 10 ans, 22 % entre 11 et 20 ans, et 18 % avaient plus de 20 ans d'expérience professionnelle (Tableau 24).

Tableau 24 : Profils des experts pendant les deux tours de Delphi (Source : Auteur,2023)

	Les experts		**Universitaires**		**Architectes**		**Praticiennes**	
Les tours	**R1**	**R2**	**R1**	**R2**	**R1**	**R2**	**R1**	**R2**
Les nombres des réponses	100/400	78/100	18	15	25	16	57	47
Femme (%)	37	39.70 (31)	55.55 (10)	46.70 (7)	36 (9/25)	43.80 (7)	31.60 (18)	36.20 (17)
Année d'expérience (%)								
≤3ans	20	19.30 (15)	5.60 (1)	6.70 (1)	4 (1)	6.30 (1)	31.60 (18)	27.65
4-10ans	40	39.70 (31)	61 (11)	60 (9)	20 (5)	18.70 (3)	42.10 (24)	(13)
11-20ans	22	23 (18)	16.70 (3)	20 (3)	40 (10)	37.50 (6)	15.80 (9)	40.45
>20ans	18	18 (14)	16.70 (3)	13.30 (2)	36 (9)	37.50 (6)	10.50 (6)	(19)
								19.14 (9)
								12.76 (6)
Profil des praticiens	**R1**	12,3	29,8	15,8	5,3	8,8	8,8	10,5	8,8
	R2	12,77%	25,53%	14,89%	6,38%	10,64%	10,64%	12,77%	6,38%
Légende	Ingénieur en G.civil ... ; Ingénieur énergéticien ; Ingénieur en environnement/procédés ; Consultant(e) ; Chef de projet ; Cadre étatique ; Auditeur/référent (HQE,LEED . ..) ; Autre							

R : Round.

Autre : R1 : Directeur QHSE, confidentiel, ingénieur d'étude, directeur d'un centre commercial/Ingénieur, non spécifié | R2 Ingénieur d'étude, Directeur QHSE, confidentiel.

Il est à noter que 22 répondants ont abandonné au cours du deuxième tour. Ceux qui sont partis appartenaient aux trois groupes, comme le montre le tableau 24. Les universitaires représentés par 18 enseignants-chercheurs au premier tour, et pendant le cycle suivant 15 participants. Les métiers de

conception présentés par 25 architectes au premier round, ce chiffre diminuant à 16 au deuxième tour. Enfin, dix praticiens abandonnaient le questionnaire pendant entre deux tours. Néanmoins, cinq référents des référentiels internationaux (HQE, BREEAM et LEED) ont transféré leur expérience de certification des projets de construction marocains sur l'importance des catégories dans le contexte du Maroc. Selon les deux histogrammes en barre (Tableau 24) pendant les deux tours (R1 et R2) et les pourcentages des participants universitaires et les architectes, démontre la représentativité des experts n'était pas biaisée pendant le deuxième tour, cela répondrait aux critères de Nair *et al.* (2011)[233]. Ainsi que la diversité des métiers et des organisations des répondants garantit que les résultats pendant les deux tours représentent les attentes et les perceptions de l'industrie de la construction sur les catégories de la durabilité les plus significatives au contexte national.

2.4.2.2 Analyse de la fiabilité

Les données collectées via les retours des experts ont été analysées par le logiciel SPSS V26 (IBM Corp., Armonk, N.Y., USA), puis quatre séries de tests ont été effectuées. En premier temps, nous considérons l'ensemble des réponses. En second temps, trois analyses indépendantes qui ont été effectuées séparément les catégories associées aux trois piliers de durabilité.

Tableau 25 : Analyse de la fiabilité pendant les deux questionnaires de Delphi (Source : Auteur,2023)

	Round 1				**Round 2**			
	Globale	Environnement	Economique	Social	Globale	Environnement	Economique	Social
Nombre des catégories	26	10	6	10	29	10	7	12
Alpha de Cronbach	0.867	0.814	0.74	0.726	0.823	0.789	0.775	0.718
Coefficient de variance	22 %	21 %	24 %	22 %	20 %	20 %	20 %	21 %

Les valeurs de l'alpha de Cronbach (Tableau 25), sont supérieures à la valeur minimale de $\alpha = 0.70$, qui nous confirme la cohérence interne des questions pendant les deux tours. De plus, une autre preuve pour de cohérence des données est le coefficient de variance, dans lequel la plupart des données collectées a de faible valeur du coefficient de variance allant de 20 % à 24 % pendant les deux tours. Afin d'éviter toute redondance entre les catégories, le test non paramétrique de corrélation rho Spearman était réalisé. Selon Ullah *et al.*(2018)[234], si deux variables sont fortement corrélées (coefficient de corrélation > 0.70), elles présentent des informations similaires par conséquent, l'une d'entre elles est redondante. Après les résultats de deux tours les combinaisons de corrélation sont dans l'intervalle [-0.135 ; 0.576], qui nous confirment que les catégories sont indépendantes. Par conséquent, les données collectées se sont révélées robustes, cohérentes et fiables.

2.4.2.3 Consensus et la stabilité

A la fin de chaque tour de la méthode de Delphi, nous examinons la stabilité et le consensus par l'intervalle interquartile (IQR). Sur les 26 catégories listées dans le questionnaire du premier tour,

seules deux catégories, « Analyse des coûts du cycle de vie (LCC) » et « Flexibilité » n'ont pas réussi à obtenir un bon consensus entre les cent participants (IQR > 1) (Annexe N). Par ailleurs, pendant le deuxième tour les 29 catégories ont un IQR compris entre 0 et 1 (inclus), indiquant que les membres du panel ont un bon consensus. Pour clôturer les tours de questionnaires de Delphi, une analyse de stabilité est nécessaire, nous utilisons le coefficient de variance. Cependant, toutes les catégories assurent une stabilité avec un CV< 0.5. Lors du deuxième tour (Annexe N), les valeurs de coefficients de variation des catégories ont diminué par rapport au premier tour ; sauf les catégories suivantes : « Management et documentation », « Fonctionnalité et facilité de gestion », « Ethique et équité », « Proximité des services », « Impacts de paysage », « Transport » et « Pollution ». Pendant ce temps, nous avons constaté qu'il a fallu beaucoup de temps pour ressaisir le niveau d'importance des catégories pendant le deuxième tour. Ainsi, des répondants hésitaient à continuer. Par conséquent, nous avons clôturé les cycles de Delphi au deuxième tour.

2.4.2.4 Analyse du classement

Les catégories des trois piliers de durabilité (Environnement, économique et social) ont été classées sur la base des réponses du panel d'experts pendant les deux tours de Delphi. Nous avons utilisé à la fois les scores moyens (M) et les valeurs d'écart-type (SD). Dans de nombreuses études Delphi, la moyenne est calculée sans considérer que les échelles utilisées sont des échelles ordinales. Il est généralement admis que les données de Likert sont similaires à celles d'une échelle d'intervalle et que le degré d'erreur de mesure résultant n'est pas significatif [222]. Le tableau 26 montre le classement des catégories pour le premier tour de l'enquête Delphi. Le score moyen pour des items va de M=3.40 (SD=0.78) pour « Management et documentation » à M=4.79 pour « Santé et bien-être » avec un écart type de 0.69. Pendant le premier tour de Delphi, les experts ont suggéré d'ajouter des catégories dans les trois piliers : environnement, économique et social. Ils ont proposé 11 nouvelles suggestions pour les trois piliers. Nous avons retenu trois nouvelles catégories (1 économique et 2 sociales) selon notre périmètre d'étude (bâtiment) et d'éviter toutes sortes de redondances dans les catégories.

De plus, après le deuxième tour (Annexe M), la fourchette de moyennes était entre M=3.13 (SD=0.888) pour « Impacts sur le paysage » à M=4.62 (SD=0.586) pour « Santé et bien-être ». Une analyse des résultats du deuxième tour révèle que le groupe d'experts a modifié ses évaluations de certaines catégories comme la catégorie eau avec un classement passant de 6^{éme} à 3^{éme} ou « Impact sur le paysage » passant de 20^{éme} place à 29 ^{éme} et « Temps de construction » avec un déclassement de 19 à 25. D'autres catégories telles que les trois premiers « Santé et bien-être », « Efficacité énergétique » et l'« Abordabilité» ont conservé leurs rangs après le deuxième tour de l'enquête.

Tableau 26 : Classement des catégories de durabilité pendant le premier tour de Delphi (Source : Auteur,2023)

		Les experts			Universitaires			Architectes			Praticiennes (ingénieurs +cadres +référents …)		
		M	SD	Classement	M	SD	Classement	M	SD	Classement	M	SD	Classement
Environnement	Sélection du site	3.76	0.85	14	3.56	1.097	20	4.16	0.850	3	3.65	0.719	20
	Aménagement du site	3.89	0.86	12	3.83	0.924	11	3.88	0.781	10	3.91	0.892	10
	Efficacité énergétique	4.37	0.80	2	4.44	0.984	2	4.08	0.759	4	4.47	0.734	2
	Matériaux de construction	4.17	0.75	3	4.11	1.023	6	4.20	0.577	2	4.18	0.735	4
	Pollution	3.94	0.75	11	4.11	0.832	5	3.92	0.759	9	3.89	0.724	11
	Gestion des déchets solides	4.02	0.89	9	4.11	1.079	7	3.96	0.889	8	4.02	0.834	8
	Gestion des risques	3.96	0.92	10	4.11	1.023	6	4.08	0.812	5	3.86	0.934	12
	Eau	4.07	0.90	6	3.78	1.114	14	4.04	0.790	6	4.18	0.869	5
	Transport alternatif	3.62	0.89	23	3.83	0.924	11	3.64	0.907	18	3.54	0.867	23
	Impacts sur le paysage	3.68	0.80	20	3.61	0.916	19	3.60	0.866	19	3.74	0.745	16
Economie	Coût du cycle de vie (LCC)	4.05	0.89	7	4.22	0.647	4	4.08	0.954	7	3.98	0.935	9
	Abordabilité	4.03	0.89	8	4.28	0.669	3	3.72	1.061	15	4.09	0.851	7
	Flexibilité	3.76	0.94	15	3.83	0.857	10	3.84	1.143	12	3.70	0.886	19
	Temps de construction	3.70	0.97	19	3.67	0.686	17	3.52	1.159	21	3.79	0.959	15
	Gestion intégrée	3.63	0.94	22	3.72	0.575	15	3.60	1.041	20	3.61	0.996	22
	Investissement	3.73	0.95	17	3.83	0.857	10	3.48	1.005	23	3.81	0.953	14
Social	Héritage architectural	3.58	0.96	25	4.06	0.639	7	3.72	1.137	16	3.37	0.899	26
	Proximité des services	3.72	0.75	18	3.78	0.647	12	3.48	0.770	22	3.81	0.766	13
	Habitabilité sociale	3.68	0.80	20	3.78	0.732	13	3.72	0.792	14	3.63	0.837	21
	Ethique et équité	3.58	0.81	24	3.72	0.669	16	3.68	0.900	17	3.49	0.805	25
	Fonctionnalité et facilité de gestion	3.77	0.79	13	3.89	0.900	9	3.80	0.957	13	3.72	0.675	17
	Management et documentation	3.40	0.78	26	3.61	0.698	18	3.00	0.866	26	3.51	0.710	24
	Sécurité et sûreté	4.16	0.88	4	4.06	0.873	8	3.84	0.943	11	4.33	0.831	3
	Santé et bien-être	4.49	0.69	1	4.56	0.511	1	4.44	0.712	1	4.49	0.735	1
	Accessibilité	4.13	0.76	5	4.22	0.647	4	4.04	0.841	6	4.14	0.766	6
	Innovation verte	3.75	0.97	16	4.28	0.669	3	3.44	1.044	25	3.72	0.959	18
Cronbach's α		0.867			0.910			0.831			0.868		
Nombre de répondants		100			18			25			57		
Coefficient de W Kendall's (concordance)		0.117			0.148			0.127			0.149		
Test du (χ^2) Degré de liberté (df) Degré de signification (p)		293.068 25 0.00			66.58 25 0.149			79.638 25 0.00			212.247 25 0.00		

Les nouvelles propositions par les experts pendant le premier tour :

Piliers	Propositions	Commentaires
Environnement	• Utilisation du potentiel bioclimatique ; • Extension urbanisme et la dégradation de l'environnement ; • Intégration urbaine ; • Qualité de l'environnement extérieur.	➔ Classé comme un indicateur dans la catégorie du site. ➔ Hors de notre périmètre d'étude. ➔ Hors de notre périmètre d'étude. ➔ A l'échelle du bâtiment, nous intéressons à la qualité de l'air à l'intérieur.

(Continue)		
Economie	• Encourager l'économie nationale ;	➔ Hors de notre périmètre d'étude, mais était indirectement induite dans le critère des matériaux de construction locaux (catégorie des matériaux).
	• Le coût économique lié à la dégradation de l'environnement ;	➔ Inclus dans la catégorie LCC.
	• Le bénéfice et retour sur l'investissement	➔ Ajouter dans la liste pour 2éme tour.
Sociale	• Mobilité et cohésion sociale ;	➔ Des indicateurs pareils intégrés dans la catégorie accessibilité.
	• Engagement politique ;	➔ Hors de périmètre d'étude qui peut introduire dans la partie gouvernement.
	• Formation et création d'emploi pour (Education et Formation) ;	➔ Retenu pour le deuxième tour.
	• Vie sociale et culturelle.	➔ Retenu pour le deuxième tour.

Nous examinons l'influence des professions sur le niveau d'importance des catégories selon trois groupes principaux : universitaires, architectes et praticiens. On trouve que les enseignants–chercheurs jugent les catégories en relation avec la recherche et formation plus importante comme l'innovation verte (M=4.2). Les architectes (métier fondamental pendant la phase de la conception) priorisent les catégories en relation avec le site comme notamment la sélection de parcelles, les matériaux de construction et l'accessibilité. Les praticiens (ingénieurs énergéticiens, environnementalistes et référents) donnent plus d'importance aux catégories : « Eau », « Abordabilité » et « Gestion des déchets solides ». Néanmoins, des catégories comme « Efficacité énergétique », « Coût du cycle de vie (LCC) », « Santé et bien-être » et autres gardent même niveau d'importance quel que soit le profil d'expert.

2.4.2.5 Accord des répondants au sein de chaque groupe d'experts

Le coefficient de concordance (W) de Kendall a été utilisé pour identifier la cohérence ou l'écart dans la perception des principaux groupes de panel d'experts, à savoir : les universitaires, les architectes et les praticiens. La valeur 0 indique qu'il n'y a pas d'accord entre les répondants, tandis que 1 signifie un accord parfait. Les résultats ont indiqué que les valeurs du coefficient de Kendall s'étaient améliorées au deuxième tour de 0.117 à 0.253 pour le panel d'expert (Tableau 26 et Annexe O) ; cependant, ces valeurs sont raisonnablement inférieures à la valeur de concordance faible de 0.30 [235]. Des résultats similaires ont été obtenus pour chaque groupe de répondants. Ces valeurs de W inférieures peuvent être considérées comme tout à fait logiques, car il devient de plus en plus difficile d'atteindre des valeurs de W plus élevées avec une augmentation du nombre des réponses [236]. Par conséquent, les résultats de l'analyse χ^2, comme indiqué dans le tableau 26 et l'annexe O, ont démontré le développement de l'accord entre les groupes de panel après le deuxième tour. Sa valeur est passée de 293.068 au premier tour à 553.448 au deuxième tour. Les deux valeurs calculées étaient beaucoup plus élevées que les valeurs critiques (pour la distribution du χ^2 de 41.337 (pour p=0.05) et 48.278

(pour p=0.01)) pour un degré de liberté (df) de 28 pendant le 2éme tour et 37.652 (pour p=0.05) et 44.314 (pour p=0.01) pour un degré de liberté de 25 dans le premier tour. De la même façon, au deuxième tour, les valeurs de χ^2 se sont améliorées pour les trois groupes de répondants, car les valeurs calculées (145.936 ; 164.937 et 400.879) étaient beaucoup plus élevées que les valeurs en premier tour (66.58, 79.638 et 212.247). En conséquent, un accord fort a été développe entre les participants de trois groupes de répondants.

2.4.2.6 Niveau d'importance et validation de l'accord des experts via l'analyse IRA

Pour la suite d'analyses, nous nous sommes intéressés aux valeurs moyennes des scores des 29 items identifiés pendant le deuxième tour de l'enquête Delphi. Toutes les 29 catégories sont considérées comme importantes par le panel d'experts pendant les deux tours. Aucune catégorie n'est en dessous de la valeur de 2.51 (Annexe O). Selon le tableau 27, la catégorie « Santé et bien-être » est passée de « Très important » à « Extrêmement important » après le deuxième tour de l'enquête Delphi. Pour l'« Abordabilité » les experts ont réduit son importance de « Très élevée » à « Elevée ». Les catégories « Transport alternatif », « Impact sur le paysage », « Temps de construction », « Gestion intégrée » et les cinq premières catégories dans le tableau 27 de pilier social ont vu réduire leur niveau de signification d'« Elevé » à « Moyen ». Les catégories attribuées comme étant « Très ou extrêmement élevées » ou « Elevées » sont jugées par le panel d'experts comme critiques pour la durabilité des bâtiments marocains.

Tableau 27 : Niveau d'importance des catégories et de concordance chez le panel d'expert (Source : Auteur,2023)

Catégories	**Round 1**		**Round 2**		**Round 1**	**Round 2**
	Score $a_{wg(1)}$	**Niveau d'accord**	**Score $a_{wg(1)}$**	**Niveau d'accord**	**Niveau d'importance**	
Sélection du site	0.58	Accord modéré	0.56	Accord modéré	Élevé	Élevé
Aménagement du site	0.54	Accord modéré	0.67	Accord modéré	Élevé	Élevé
Efficacité énergétique	0.40	Accord faible	0.60	↑Accord modéré	Très élevé	Très élevé
Matériaux de construction	0.57	Accord modéré	0.58	Accord modéré	Très élevé	Très élevé
Pollution	0.64	Accord modéré	0.63	Accord modéré	Élevé	Élevé
Gestion des déchets solides	0.47	Accord faible	0.62	↑ Accord modéré	Très élevé	Très élevé
Gestion des risques	0.46	Accord faible	0.73	↑ Accord fort	Élevé	Élevé
Eau	0.44	Accord faible	0.61	↑ Accord modéré	Très élevé	Très élevé
Transport alternatif	0.57	Accord modéré	0.65	Accord modéré	Élevé	↓Moyen
Impacts sur le paysage	0.64	Accord modéré	0.61	Accord modéré	Élevé	↓Moyen
LCC	0.46	Accord faible	0.71	↑ Accord fort	Très élevé	Très élevé
Abordabilité	0.46	Accord faible	0.65	↑ Accord modéré	Très élevé	↓Élevé
Flexibilité	0.48	Accord faible	0.78	↑Accord fort	Élevé	Élevé
Temps de construction	0.47	Accord faible	0.76	↑Accord fort	Élevé	↓Moyen
Gestion intégrée	0.52	Accord modéré	0.73	↑Accord fort	Élevé	↓Moyen
Investissement	0.48	Accord faible	0.65	↑Accord modéré	Élevé	↓Moyen
Le bénéfice et retour sur l'investissement (Nv)			0.80	Accord fort		Moyen

(Continue)	Round 1		Round 2		Round 1	Round 2
Catégories	**Score $a_{wg(1)}$**	**Niveau d'accord**	**Score $a_{wg(1)}$**	**Niveau d'accord**	**Niveau d'importance**	
Héritage architectural	0.51	Accord modéré	0.63	Accord modéré	Élevé	↓Moyen
Proximité des services	0.68	Accord modéré	0.65	Accord modéré	Élevé	↓Moyen
Habitabilité sociale	0.64	Accord modéré	0.69	Accord modéré	Élevé	↓Moyen
Ethique et équité	0.65	Accord modéré	0.67	Accord modéré	Élevé	↓Moyen
Fonctionnalité et facilité de gestion	0.64	Accord modéré	0.69	Accord modéré	Élevé	↓Moyen
Management et documentation	0.69	Accord modéré	0.59	Accord modéré	Moyen	Moyen
Sécurité et sûreté	0.42	Accord faible	0.63	↑Accord modéré	Très élevé	Très élevé
Santé et bien être	0.47	Accord faible	0.51	↑Accord modéré	Très élevé	↑Extrêmement élevé
Accessibilité	0.58	Accord modéré	0.77	↑Accord fort	Très élevé	Très élevé
Innovation verte	0.46	Accord faible	0.63	↑Accord modéré	Élevé	Élevé
Education et Formation (Nv)			0.76	Accord fort		Moyen
Vie sociale et culturelle (Nv)			0.76	Accord fort		Moyen

Note : ↑ augmente ↓ diminue, Nv : Nouveau

Les statistiques sur les accords entre évaluateurs (IRA) ont été utilisées, les catégories : « Efficacité énergétique », « Gestion de déchets solides », « Eau », « LCC », « Abordabilité », « Sécurité et sûreté », « Santé et bien-être » et « Innovation verte », ont un niveau de l'accord « Faible » dans le premier tour de l'enquête Delphi (Tableau 27). Elles sont mesurées à un niveau d'accord « Modéré » après le deuxième tour. Les deux catégories « Gestion intégrée » et « Accessibilité » sont passées d'un accord « Modéré » à « Fort ». Tandis que les catégories : « Gestion des risques naturels », « Flexibilité » et « Temps de construction » ont augmenté de manière significative de « Faible » à « Accord fort ». Cependant, aucune diminution de niveau d'accord n'a été relevée pendant les deux tours de Delphi. En général, l'analyse de l'IRA pendant les deux tours de Delphi a montré l'amélioration de niveau d'accord entre les panélistes pour la majorité des catégories. Cela démontre une certaine concordance atteinte par le panel d'experts après la deuxième tour de Delphi. Ces résultats soutiennent le développement du consensus obtenu grâce au test χ^2 et la mesure de l'interquartile (IQR).

2.4.3. Effet d'expérience professionnelle sur les résultats de classement

Jusqu'à présent, toutes les analyses ont été menées en partant de l'hypothèse que le jugement des participants était égal, quelle que soit l'expérience professionnelle acquise. Les participants ont été divisés en deux groupes comprenant des experts ayant moins ou égal 10 ans d'expérience professionnelle et des experts ayant plus de 10 ans. Le premier groupe comprenait 46 experts et le deuxième groupe comprenait 32 experts.

Une cohérence parfaite a été constatée lorsque l'on compare les classements des catégories sociales et d'économies de tous les experts (Figure 44). Les trois groupes ont attribué les mêmes classements aux quatre premières catégories. Cela montre que les années d'expérience n'influencent pas la

notation des meilleures catégories sociales et économiques. Cependant, il existe certaines divergences pour d'autres catégories. La catégorie « Investissement initial » a été rangé par tous les répondants comme le sixième en pilier économique. Tandis que les experts ayant moins de 10 ans d'expérience et l'autre plus de 10 ans d'expérience l'ont classé respectivement septième et cinquième.

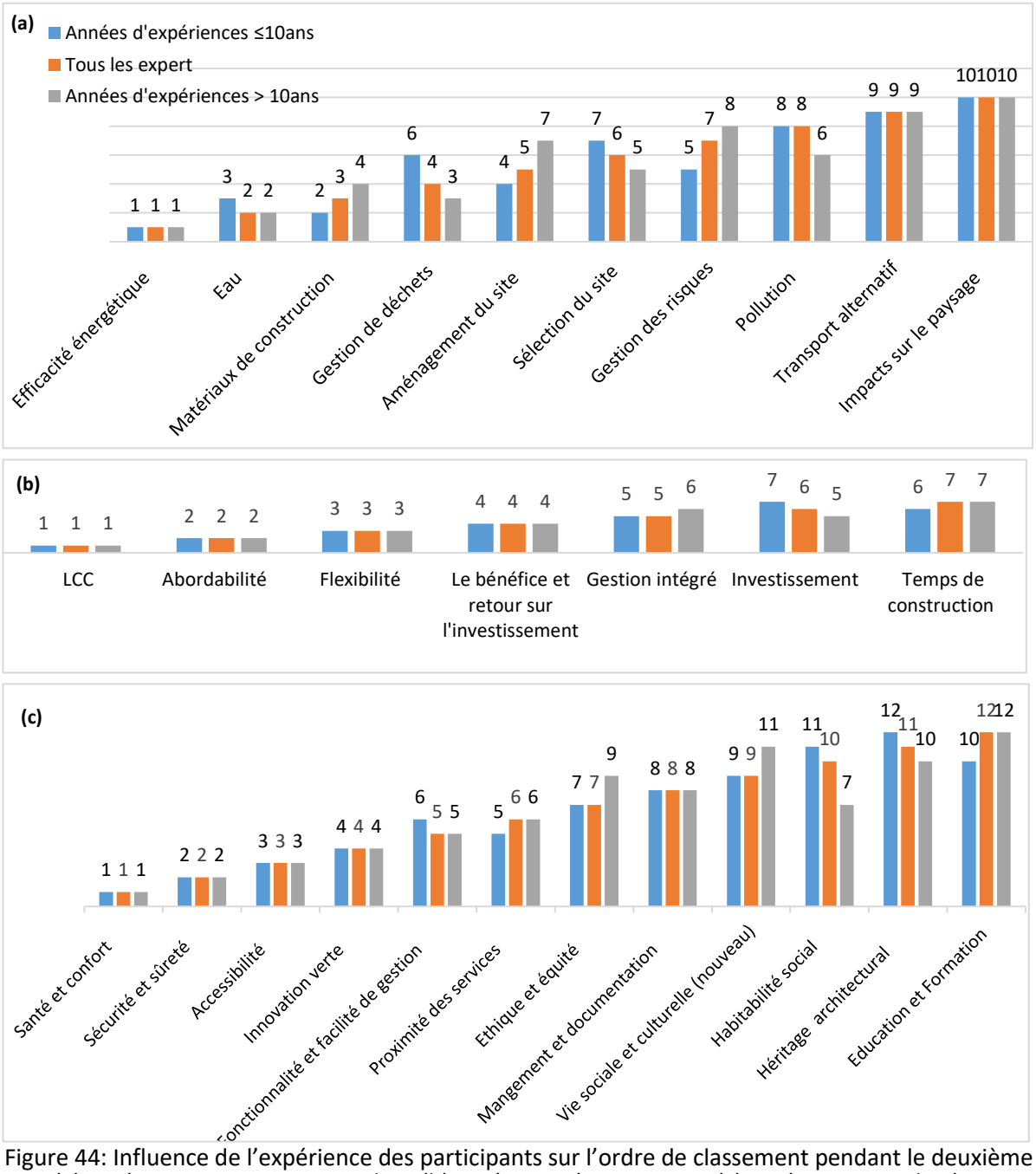


Figure 44: Influence de l'expérience des participants sur l'ordre de classement pendant le deuxième tour, (a) Catégories environnementales ; (b) Catégories économiques;(c) Catégories sociales (Source : Auteur,2023)

C'est dans le pilier environnemental que l'on constate moins de cohérence en termes de classement des catégories par les deux groupes (Figure 44 (a)). Alors que les trois groupes de répondants étaient d'accord sur le rangement de la catégorie « Efficacité énergétique » en tête de classement et les deux dernières catégories (9^{éme} et 10 ^{éme}). Néanmoins, il y avait des incohérences mineures dans les rangs

des catégories environnementales intermédiaires (2 vers 8^{éme}), dans lesquelles les deux groupes avec des expériences différentes ont donné la priorité à ces catégories de manière différente. On peut conclure que les années d'expérience dans le domaine des projets de construction et d'écoconstruction n'entraînent pas une influence majeure sur le classement des catégories d'évaluation de trois piliers de développement durable.

2.4.4. Référentiel d'évaluation de la durabilité du bâtiment marocain

Après les analyses statistiques, les 29 catégories de deuxième tour de Delphi ont reçu un niveau d'importance extrême élevé à niveau d'importance moyen et aucune catégorie n'a été classée comme un niveau d'importance « Faible » (Figure 45).

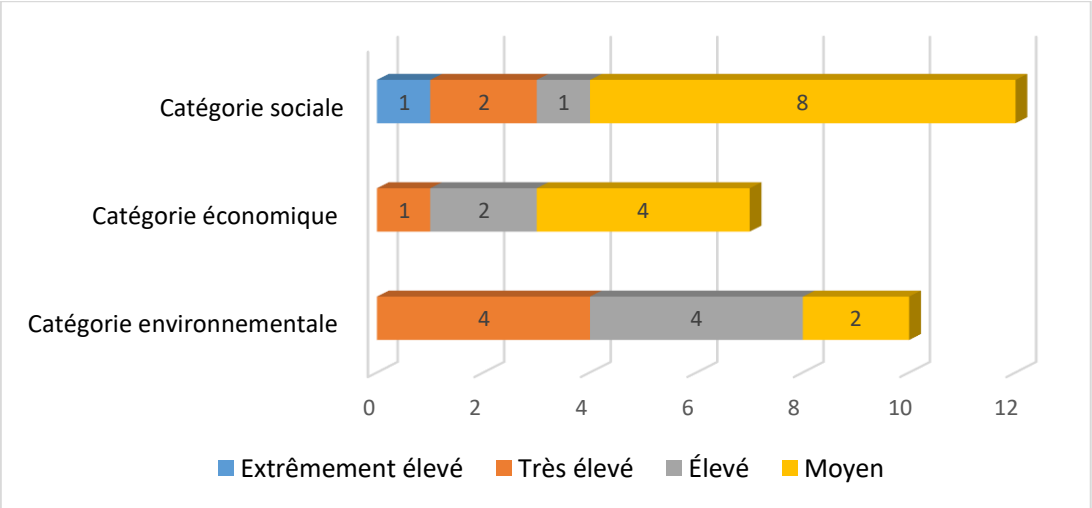


Figure 45: Nombre des catégories affectées à chacun des niveaux d'importance (Source : Auteur,2023)

Il apparaît que les experts jugent que les catégories environnementales jouent un rôle plus important que les critères sociaux et économiques. Cela était remarqué à partir de deux manières différentes ; en tenant compte des cinq premières catégories les mieux classées où les catégories en 2^{éme} , 3^{éme} et 4^{éme} classement appartiennent à la dimension environnementale. Cependant, la première et cinquième appartiennent à la catégorie sociale. De plus, en utilisant la deuxième manière, qui se base sur la comparaison de la fréquence relative des catégories de niveau d'« Extrêmement élevé » à « Élevé » dans chaque catégorie de dimension de durabilité, le pilier environnement était toujours la préoccupation principale du panel d'expert suivi par la dimension sociale. Selon la figure 45, 80 % des catégories environnementales ont été jugées d'importance « Très élevée » et « Elevée », en revanche les catégories sociales et économiques présentent 50 % et 43 %, respectivement.

Le référentiel BuSAF se base sur les trois piliers de la durabilité : la durabilité environnementale (BuSAF (Env)), la durabilité économique (BuSAF (Eco) et la durabilité sociale (BuSAF (Soc)). La présente thèse, se base sur les catégories clés avec un niveau d'importance élevé (≥ 3.5). La figure 46 répertorie toutes les catégories choisies (7 catégories environnementales, 3 catégories économiques et 4 catégories sociales), les définitions des catégories ont été écrites dans le glossaire à la fin du manuscrit.

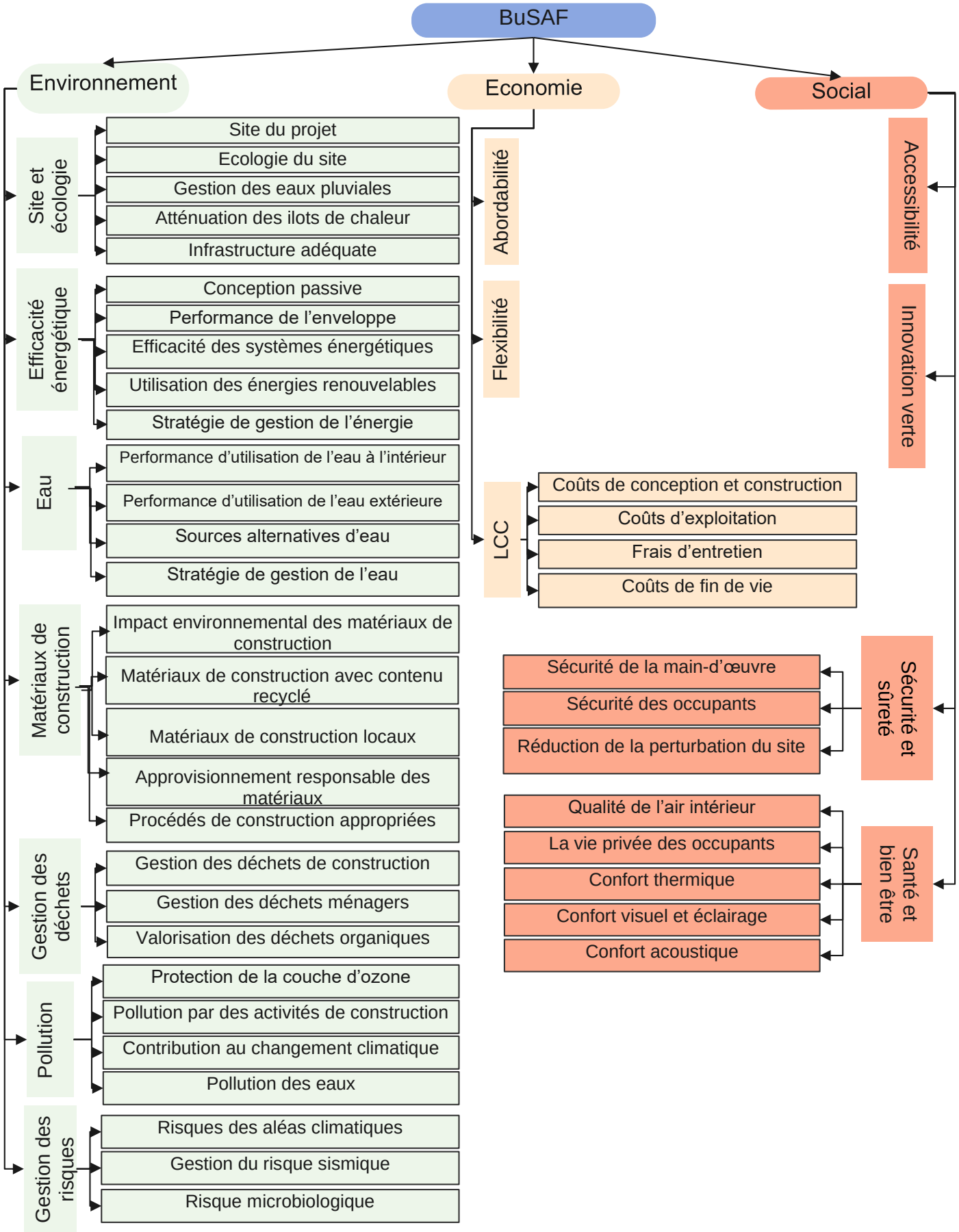


Figure 46: Référentiel du système d'évaluation de durabilité des bâtiments au Maroc (BuSAF) (Source : Auteur,2023)

Nous faisons remarquer que nous avons fusionné les catégories « Sélection de site », « Aménagement de site » et « Impacts sur le paysage » en catégorie « Site et écologie ». Pendant la hiérarchisation du troisième niveau « Sous-catégorie », la catégorie « Innovation verte » du pilier social se compose toutes les innovations dans les autres catégories. A titre d'exemple, utilisation d'un système intelligent de gestion de l'énergie sera comptée dans la catégorie « Innovation verte » du pilier social. Cela fragmente de plus les catégories d'évaluation. C'est pour cela, nous avons réintégré la catégorie de l'innovation verte dans toutes les catégories d'évaluation de performances de durabilité comme une sous-catégorie. En troisième niveau, nous avons hiérarchisé chaque catégorie de trois piliers en sous-catégorie, on se base sur les études bibliographiques ([234], [237]–[241]) et la liste des indicateurs de la norme ISO 21929-1-2011 (Cadre de développement des indicateurs). Un total de 41 sous-catégories sont identifiées pour les 13 catégories de durabilité (Figure 46).

2.5. La hiérarchisation des catégories environnementales de BuSAF(Env)

L'étape suivante permet d'identifier les critères d'évaluation les plus appropriés pouvant aborder la variété régionale du Maroc. La plupart des critères (indicateurs) peuvent directement transférables des autres systèmes internationaux, mais avec des seuils de performance différents. Certains critères peuvent nécessiter une contextualisation et des nouveaux critères peuvent être nécessaires pour tenir compte de la spécificité du Maroc.

2.5.1. Cadre conceptuel du BuSAF(Env)

L'objectif des critères est de fournir des mesures de la performance avec une démarche claire [242]. Dans un premier temps, une liste des critères et des indicateurs des neuf référentiels sélectionnés en chapitre 1 est fusionnée avec celles de la littérature ([234], [237]–[241]); cette consolidation a permis d'identifier une pré-liste des critères. Nous avons complété la liste par les indicateurs proposés par la norme ISO 21929-1,2011(Cadre de développement des indicateurs)[216]. Cependant, certains indicateurs de la norme ISO 21929-1,2011 ne font pas partie d'évaluation dans les référentiels existants. A titre exemple, « L'effet d'îlot de chaleur » n'est pas inclus dans l'évaluation des 9 GBRS, à l'exception des trois référentiels BREEAM, Green Star et Pearl Rating System. Le risque d'incendie « Fire safety » et la sécurité des utilisateurs « Safety in use » est considéré que dans le référentiel LEED. Le problème de la sélection du nombre approprié des critères d'évaluation est toujours présent pendant le développement des référentiels de certification. La sélection d'un seul indicateur facilite la décision, mais peut également d'être une perte d'informations. D'autre part, un trop grand nombre de critères et d'indicateurs peut limiter la compréhension et l'importance relatives de chaque critère. Idéalement, il devrait y avoir un nombre limité d'indicateurs avec des mesures standardisées qui sont facilement comparables avec des objectifs, des seuils ou d'autres normes appropriées [243]. Par exemple, Ali *et al.* (2009)[16] ont hiérarchisé les catégories de la durabilité environnementale en 42

critères , alors que Al-Jebouri *et al*. (2017)[202] ont proposé 84 critères liés aux cinq piliers de durabilité à savoir (Environnement, économie, social, culture et la gouvernance). Tandis que l'équipe Janjua *et al*.(2020)[204] ont 22 indicateurs quantitatifs basés sur les résultats de l'analyse du cycle de vie pour évaluer la durabilité des logements résidentiels. Olawumi *et al.*(2020)[212] ont proposé un système d'évaluation de la durabilité des bâtiments selon 32 indicateurs et 136 sous-indicateurs. Par conséquent, la sélection des indicateurs doit répondre aux facteurs suivants adaptés de l'étude de Kibira *et al.*(2018)[244] :

1. Règles de mesurabilité : cette règle exige que le critère ou l'indicateur puisse être évalué au niveau actuel de la technologie et du savoir-faire et répondre aux propriétés suivantes :
    - Accessibilité des données : la collecte des données est souvent une tâche lourde et coûteuse. C'est-à-dire qu'il doit être relativement simple de collecter les données nécessaires pour l'évaluation.
    - Spécificité : doit être directement lié aux résultats.
    - Compréhensibilité : facilement compréhensible par le grand public.
2. Règles d'efficacité : cette règle exige que les d'indicateurs ignorent certains problèmes qui ont un impact minimal sur l'évaluation de durabilité des bâtiments résidentiels.
3. Sensible : capable de refléter les changements sur une période temporelle est l'un des facteurs les plus importants dans le choix des indicateurs de durabilité en raison de la dynamique changeante des critères de performance.

2.5.2. Sélection des critères environnementaux

A partir de la liste complète des critères (Annexe P), des discussions structurées ont été menées afin d'obtenir les commentaires deux experts professionnels du bâtiment pour affiner la liste finale. Bien qu'il existe deux types des critères, quantitatifs et qualitatifs. Les critères qualitatifs concernent plus généralement la perception du changement (Oui ou non) aux critères d'évaluation. Les indicateurs quantitatifs font la plupart du temps référence à des proportions, des ratios ou des taux. L'importance des critères sélectionnés peut être considérée par rapport à la limite d'échelle spatiale par rapport au bâtiment (Figure 47). En parlant d'une « Echelle micro », lorsqu'on se limite au périmètre du bâtiment (Eau, énergie, etc.); l' « Echelle méso » lorsque s'intéresse aux catégories liées à la planification urbaine et du quartier (comme l'utilisation des terres et la sélection du site, les considérations de planification). Plus large les problèmes nationaux à l'« Echelle macro» (Comme les émissions de gaz à effet de serre, les transports et les infrastructures) et aux problèmes transnationaux (Changements climatiques).

Alors, que la limite temporelle dépend des cycles de vie du bâtiment (Conception (Design) : D, construction : C, utilisation (Operation) : O, maintenance et entretien et la démolition), par exemple les critères liés à la catégorie du « Site et écologie » sont évalués pendant la phase de conception du projet.

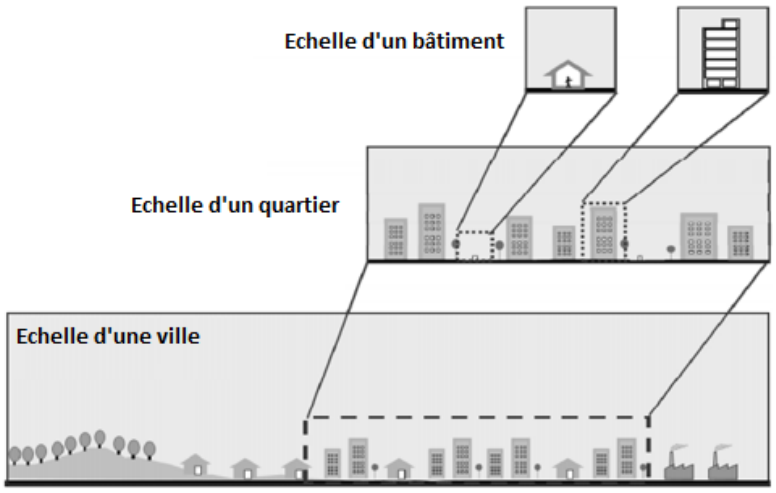


Figure 47: Périmètre spatial des critères d'évaluation

La présente thèse se positionne principalement à une échelle « Bâtiment », pendant les deux phases : conception et exploitation. La phase de construction n'est pas prise en compte dans certaines catégories d'évaluation, telles que l'énergie et eau, car elles ont un impact relativement faible par rapport au cycle de vie du bâtiment (50 ans). En revanche la catégorie « Gestion des déchets » de construction est importante. Les limites sont légèrement variables en fonction des critères d'évaluation. Le choix d'une parcelle proche aux commodités publiques est lié à l'infrastructure urbaine (quartiers) que le périmètre du bâtiment. Le tableau 28 montre l'échelle d'application des critères environnementaux sélectionnés et selon les phases de vie du bâtiment.

Tableau 28: Critères d'évaluation environnementale du système BuSAF(Env) (Source : Auteur,2023)

Catégorie	Sous-catégories	Critères d'évaluation	Échelle micro	Echelle méso	Echelle macro	Phase de vie du bâtiment		
						D	C	O
SE. Site et écologie	SE.1. Site du projet	Sélection appropriée du site	-	-	✓	✓	-	-
		Réutilisation des zones précédemment construites ou contaminées	-	✓	-	✓	-	-
		Proximité des commodités	-	✓	-	✓	-	-
	SE.2. Ecologie du site	Gestion de l'écologie du site	✓	-	-	✓	-	-
		Végétalisation des surfaces	✓	-	-	✓	-	✓
	SE.3. Gestion des eaux pluviales		✓	-	-	✓	✓	✓
	SE.4. Atténuation des îlots de chaleur	Réduction des îlots de chaleur de Hardscape	✓	-	-	✓	-	✓
		Réduction des îlots de chaleur sur les surfaces externes	✓	-	-	✓	-	✓
	SE.5. Infrastructure adéquate		-	✓	-	✓	-	-
	EE.1. Conception passive	-	✓	-	-	✓	-	
	EE.2. Performance de l'enveloppe	Transfert de chaleur à travers les murs	✓	-	-	✓	-	✓
		Transfert de chaleur par les toits et les planchers	✓	-	-	✓	-	✓
		Rayonnement solaire à travers les fenêtres	✓	-	-	✓	-	✓
		Ponts thermiques et infiltration de l'air	✓	-	-	✓	-	✓
		Ventilation mécanique centralisée (VMC)	✓	-	-	✓	-	✓

EE. Efficacité énergétique	EE.3. Efficacité des systèmes énergétiques	Équipement de chauffage et de climatisation	✓	-	-	✓	-	✓
		Système d'eau chaude	✓	-	-	✓	-	✓
		Efficacité de l'éclairage	✓	-	-	✓	-	✓
		Performance des appareils électroménagers	✓	-	-	✓	-	✓
		Ascenseurs écoénergétiques (si présent)	✓	-	-	✓	-	✓
	EE.4. Utilisation des énergies renouvelables		✓	-	-	✓	-	✓
	EE.5. Stratégie de gestion de l'énergie	Suivi de la consommation d'énergie	✓	-	-		-	✓
		Programme de maintenance des systèmes énergétiques	✓	-	-	✓	-	✓
		Sensibilisation à la conservation de l'énergie	✓	-	-	-	-	✓

Catégorie	**Sous-catégories**	**Critères d'évaluation**	**Échelle micro**	**Echelle méso**	**Echelle macro**	**Phase de vie du bâtiment**		
						D	**C**	**O**
E. Eau	E.1.Performance d'utilisation de l'eau à l'intérieur		✓	-	-	✓	-	✓
	E.2. Performance d'utilisation de l'eau extérieure	Aménagement paysager économe en eau	✓	-	-	✓	-	✓
		Efficacité du système d'arrosage	✓	-	-	✓	-	✓
		Mettre en place des stratégies pour réduire la consommation d'eau des loisirs	✓	-	-	✓	-	✓
	E.3. Sources alternatives d'eau	Récupération des eaux pluviales	✓	-	-	✓	-	✓
		Réutilisation des eaux grises	✓	-	-	✓	-	✓
		Réutilisation des eaux usées traitées	✓	✓	-	✓	-	✓
	E.4. Stratégie de gestion de l'eau	Suivi de la consommation des ressources en eau	✓	-	-		-	✓
		Gestion des fuites d'eau	✓	-	-	✓	-	✓
		Sensibilisation à la conservation de l'eau	✓	-	-		-	✓
MC. Matériaux de construction	MC.1. Impact environnemental des matériaux de construction		✓	-	-	✓	-	-
	MC.2. Matériaux de construction avec contenu recyclé		✓	-	-	✓	✓	-
	MC.3. Matériaux de construction locaux		✓	-	-	✓	✓	-
	MC.4. Approvisionnement responsable des matériaux		✓	-	-	✓	-	-
	MC.5. Procédés de construction appropriés		✓	-	-	✓	✓	-
GD. Gestion des déchets solides	GD.1. Gestion des déchets de construction		✓	✓	-	✓	✓	-
	GD.2. Gestion des déchets ménagers		✓	✓	-	✓	-	✓
	GD.3. Valorisation des déchets organiques		✓	✓	-	✓	-	✓
P. Pollution	P.1. Protection de la couche d'ozone		-	-	✓	✓	-	✓
	P.2. Pollution des activités de construction		✓	-	-	✓	✓	-
	P.3. Contribution au changement climatique		-	-	✓	✓	-	✓
	P.4. Pollution des eaux		-	-	✓	✓	-	✓
GR. Gestion des risques	GR.1. Risques des aléas climatiques		✓	-	-	✓	-	✓
	GR.2. Gestion du risque sismique		✓	-	-	✓	-	-
	GR.3. Risque microbiologique		✓	-	-	✓	-	✓

Un total de 49 critères sont élaborés pour évaluer la performance environnementale des bâtiments résidentiels. Les critères sélectionnés s'intéressent à l'échelle micro-« Bâtiment », alors que les critères liés à la catégorie « Site et écologie » étaient élargis vers l'échelle du quartier ou même d'une ville (méso). Ces critères s'adoptent pour les différentes étapes du cycle de vie du projet sont présentés dans le tableau 28.

2.5.3. Développement des fiches descriptives pour les critères d'évaluation

Nous avons établi des fiches descriptives de chaque critère d'évaluation. L'arborescence de la Figure 48 donne un aperçu général de la méthodologie. Les principales branches gauche et droite sont respectivement liées au score et au poids. Dans cette partie, nous nous concentrons sur les scores des critères ou d'indicateurs, dans le but d'arriver à des valeurs normalisées. La partie pondération sera traitée dans le chapitre prochain.

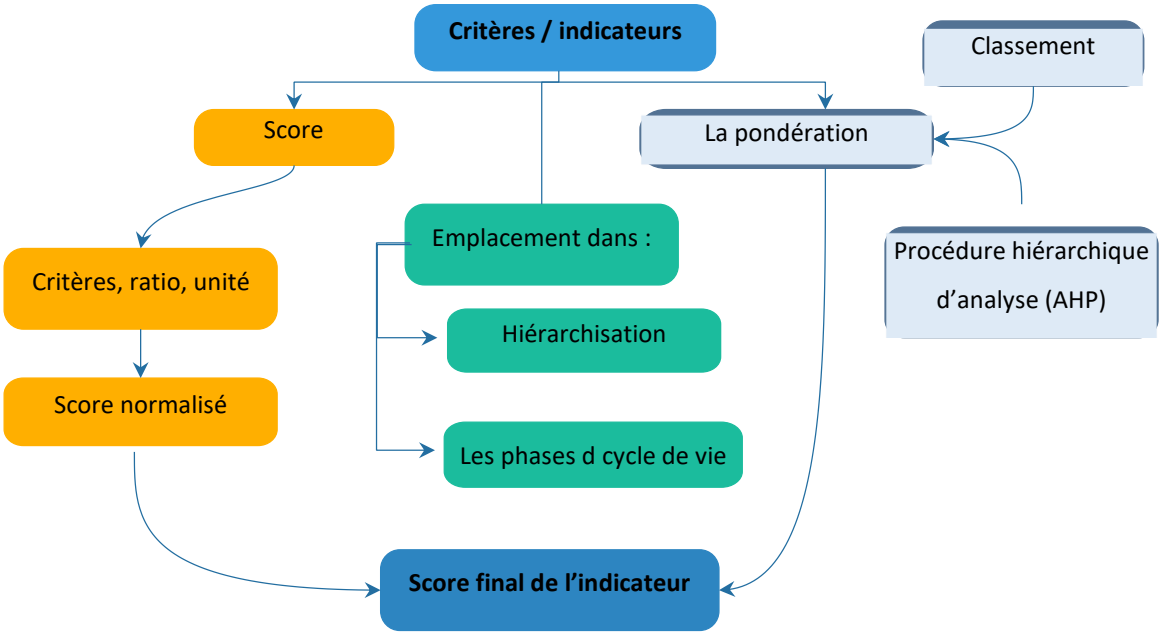


Figure 48: Schéma global pour un score final d'un critère/d'indicateur (Source : Auteur,2023)

Pour chaque critère d'évaluation, les points suivants sont mis en évidence sur la fiche descriptive (Figure 49) :

- L'information générale sur les critères : elle contient une description et le principal objectif avec l'échelle spatiale (micro ou méso) et la phase du cycle de vie d'application ;
- La réglementation nationale qui encadre le critère (s'il y a lieu) ;
- La méthode d'évaluation et /ou de calcul : fournit une description de ce qui doit être réalisé pour répondre à l'intention du critère ;
- L'attribution de points sur la base de certaines mesures (quantitatives et qualitatives) satisfaites ;
- Les exigences : spécifie les exigences requises pour chaque sous-catégorie et donne une description de la manière dont les points de crédit seront attribués ;
- La soumission requise pour l'évaluation : donne des indications claires avec une liste de contrôle des documents de projet.

Critère :

Objectif :	Echelle :	La réglementation nationale :
	Phase d'application :	
	Type d'évaluation	

Indicateur	Méthode d'évaluation/calcul	Score	Documentation/Justificatif

Figure 49: Modèle de la fiche descriptive d'un critère d'évaluation (Source : Auteur,2023)

Dans le cas où le critère est exigé par la réglementation nationale ou nous suggérons qu'il est important pour la durabilité environnementale du bâtiment, nous l'avons cité dans la case du point comme « Prérequis ».

2.5.3.1 La méthode d'évaluation et de notation

Les chercheurs ont adopté des approches d'évaluation différentes, chacune ayant ses propres caractéristiques et échelles d'évaluation, comme nous le montrons dans le tableau 29 pour évaluer le critère « Choix du site » par les deux GBRS (BREEAM et GPRS) et les études suivantes : Tupenaite *et al*. (2018)[245], Karaca *et al.* (2020)[238], Janjua *et al.* (2020)[246] et Lazar *et al.* (2022)[247] ont été discutés. L'étude au Kazakhstan et les pays de Baltes ont utilisé une échelle de dix pour évaluer les critères de performance par des évaluateurs d'une façon subjective. La méthode utilisée dans l'étude de Lazar *et al.* (2022)[247] basé sur l'avis d'un groupe d'expert de déterminer le pourcentage minimum pour 0 point et le max pour avoir un point, mais ne précise pas le type de la relation entre le pourcentage est les points, par exemple, si le propriété a réaménagé 45 % de la parcelle, donc la notation de ce critère est 0.5 points ou autre valeur. Alors que le système britannique (BREEAM) a fixé un pourcentage seuil de performance pour arriver aux crédits disponibles.

La subjectivité dans l'évaluation des critères de performance peut entraîner des résultats biaisés et peu fiables. Les évaluateurs peuvent avoir des opinions personnelles et des biais qui peuvent influencer leurs jugements et leurs scores attribués.

Tableau 29: Exemples des méthodes d'évaluation du critère « Choix du site » (Source : Auteur,2023)

BREEAM	**GPRS**	**Les pays de Baltes** [245]	**RSAM, Kazakhstan** [238]	**Australie**[246]	**Inde** [247]
- Pourcentage du terrain précédemment occupé (2 crédits) : <75% : 1 ; >95% : 2. - Terrain contaminé (1 crédit).	- Sélection de sites dans les zones désertiques (1 crédits) ; - Réaménagement des espaces informels (2 crédits) ; - Réaménagement de friches industrielles (3 crédits).	Le site choisi du projet doit respecter la réglementation municipale et le contexte environnemental. Indicateurs qualitatifs, évalués sur une échelle de 10 points par des experts : 1 = le site n'est pas approprié pour le projet, 10=le site est parfaitement sélectionné.	Evaluer la durabilité du site en comparant à un cas « idéal » sur une échelle de 10 points : Extrêmement pauvre : 0 Pauvre : 2 Optimal : 5 Mieux qu'optimal : 7 Excellent : 10	Empreinte écologique (utilisation des sols) : (Hag/m²/an).	Pourcentage de la superficie totale du site précédemment aménagé et/ou contaminé traité (Min=0 point, 10% - Max=1 points ,100%).

Une approche plus objective de l'évaluation des critères de performance est donc souhaitable. Cela peut être réalisé en utilisant des indicateurs quantitatifs et des seuils de performance clairement définis et également d'utiliser des méthodes d'évaluation normalisées, comme l'analyse du cycle de vie (ACV). Janjua *et al.(*2020)[246] a intégré des indicateurs quantitatifs de l'ACV pour évaluer la performance environnementale des bâtiments résidentiels australiens avec un référencement aux résultats des autres de recherche et des données spécifiques au contexte de l'Australie utilisées comme des valeurs référentielles. Francis e*t al.*(2022)[248] ont établi un modèle dynamique d'évaluation de la durabilité des bâtiments sur la base de l'ACV. Ils ont utilisé des indicateurs tels que l'empreinte écologique, Analyse des coûts du cycle de vie (LCC) et l'indicateur social « Nombre d'emplois ».

L'intégration des indicateurs de l'analyse cycle de vie dans les GBRS est freinée par certains obstacles. Le plus fréquent est le temps, les contraintes de disponibilité des données et de ressources, ainsi que les connaissances spécialisées requises sont des défis fréquemment mentionnés [249], [250]. En outre, les données concernant les fiches de déclaration environnementale de produits ne sont souvent pas disponibles au Maroc ni des bases de données génériques (Ecoinvent, GaBi etc.) utilisées. Par conséquent, la mise en application de l'ACV dans les GBRS nécessite des recherches supplémentaires sur la simplification et des approches qui augmentent l'efficacité de l'application de l'ACV.

En conclusion, il est important de reconnaître les limites de la subjectivité dans l'évaluation des critères de performance des bâtiments. Une approche plus objective, basée sur des indicateurs quantitatifs et des seuils de performance clairement définis, est préférable pour obtenir des évaluations fiables et comparables. L'implication d'experts qualifiés et l'utilisation de méthodes d'évaluation reconnues peuvent contribuer à réduire la subjectivité. D'autres méthodes d'évaluation sont confrontées dans des articles de recherche, comme Gangolells *et al.* (2009)[251] ainsi que Ding *et al.* (2010)[252]. La description des échelles d'évaluation (0, 1, 2, 3 et 1 à 5) est fournie, mais il manque des informations

sur la façon dont ces échelles ont été utilisées pour évaluer les indicateurs de performance et les critères environnementaux.

Dans le référentiel BuSAF proposé, nous avons basé sur une échelle de point allant de -1 à +5 selon le niveau de la performance (Tableau 30), la valeur négative -1 est utilisée pour noter la performance insatisfaisante. On attribue des points positifs plus que négatifs afin d'encourager les projets impliqués dans des projets de développement durable. Les critères d'évaluation contiennent des notes quantitatives et qualitatives avec des unités différentes. Pour agréger ces scores, ils doivent être transformés en une dimension commune ou en une unité commune sans dimension. Dans ce cas, la normalisation est essentielle. Pour chaque critère d'évaluation, les seuils pour chaque niveau sont préalablement définis en utilisant une « Fonction échelonnée » (Figure 50).

Tableau 30: Méthode de notation les critères du BuSAF (Source : Auteur,2023)

Echelle de la performance	**Points**
Négative : Performances insatisfaisantes (déficientes) qui n'est pas susceptible de respecter les réglementations ou la performance de l'indicateur a un impact négatif sur l'environnement	-1
Suffisante : norme actuelle (performance minimale acceptable)	0
Bonne performance	3
Excellente performance, qui présente un caractère exceptionnel	5

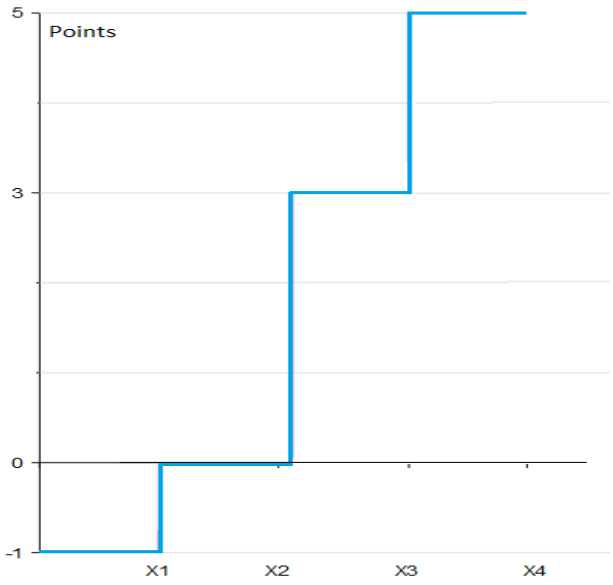


Figure 50: Fonction échelonnée des critères d'évaluation (Source : Auteur,2023)

Pour contrôler la subjectivité de l'évaluation, le niveau de performance des critères d'évaluation devrait être évalué par rapport aux valeurs référentielles X1, X2, X3 et X4 de la figure 50.

2.5.3.2 Les échelles et seuils de performance des critères

Nous proposons que chaque score du critère soit basé sur un ratio de performance de seuil/ pourcentages performances. Cette proposition est une mesure de réduction de la subjectivité pendant la phase d'évaluation. Il s'agit donc, d'une nouvelle contribution de notre thèse sur les critères d'évaluation de durabilité, répondant ainsi à l'une des préoccupations de l'étude de Chandratilake *et al.*(2015)[253] sur le développement des indicateurs quantitatifs pour les aspects de durabilité. Concernant l'absence des seuils référentiels de la réglementation nationale dans la majorité des critères, nous nous sommes basés sur les rapports des études de recherche dans le contexte du Maroc ([254]–[257]), l'avis des experts. Dans le cas échéant, nous nous référons aux normes et réglementations internationales, telles que: Standard ASHRAE 62.2-2019 « Ventilation And Acceptable

Indoor Air Quality in Residential Buildings », l'ASHRAE 90.1-2019 « Energy Standard For Buildings Except Low-Rise Residential Buildings », ASHRAE 189.1-2020 « Standard for the Design of High-Performance Green Buildings » et VDI 4707 Blatt 3-2018 « Lifts - Energy efficiency ». Cependant, vu la variété régionale au Maroc par l'ampleur de la variabilité climatique, la diversification des potentiels en énergie renouvelable et des ressources naturelles, il est important de régionaliser les seuils de performance. Pour le critère « Captage des eaux pluviales » sur le site du bâtiment, nous devons plus exigeants dans la région d'Er-Rachidia où la pluviométrie annuelle est environ 150 mm que la région d'Ifrane (1100 mm). Donc, nous régionalisons des critères d'évaluation du BuSAF, dans le cas où les critères d'évaluation dépendent des ressources naturelles et énergétiques disponibles sur le site. Les fiches descriptives de 49 critères du référentiel BuSAF(Env) sont détaillées en annexe (Q).

En figure 51, nous citerons l'exemple du critère 2 : Réutilisation des zones précédemment construites ou contaminées « Greyfield land », sous-catégorie : « SE.1. Site du projet » de la catégorie « Site et écologie ». On discute le choix du pourcentage 75 % dans la zone 1 et 50 % pour la zone 2 pour arriver à 3 points.

Catégorie : Site et écologie Sous-catégorie :SE.1. Site du projet Critère 2 : Réutilisation des zones précédemment construites ou contaminées « Greyfield land ».	Objectif : Eviter le développement du projet sur des terrains vierges qui n'ont pas été perturbés auparavant et encourager le développement du projet sur des sites déjà utilisé réhabilitation ou sur des zones classées comme des « Friches industrielles ».
Echelle : Site Phase d'application : Conception Type d'évaluation : Quantitative (%)	La réglementation nationale : Au Maroc, il n'existe pas un cadre juridique spécifique au « Sols pollués ».

Indicateur	Méthode d'évaluation/calcul	Documentation/Justificatif
Pourcentage de la surface a été réutilisé ou une friche industrielle	La formule utilisée pour calculer cet indicateur est : $\frac{\text{Surface de la partie réutilisée}}{\text{Surface total du projet}}$	- Prouver que le site est précédemment exploité comme une friche industrielle ou greyfield land à travers des agences urbaines ou par les communes. - Lorsque l'assainissement des sols pollués est nécessaire, des preuves documentaires doivent être fournies que le site a été correctement assaini.

Notation :

	Echelle (%)		Points
	Zone 1	Zone 2	
Négative	-	-	-1
Suffisante	0	0	0
Bonne performance	≥ 75	≥ 50	3
Excellente performance	≥ 95	≥ 75	5

Zone 1 : la population urbaine > 500000 (Casablanca, Fès, Tanger, Marrakech, Rabat, Agadir et Oujda)
Zone 2 : la population urbaine < 500 000
https://www.hcp.ma/downloads/?tag=Annuaires+statistiques+des+r%C3%A9gions

Figure 51: Exemple de la fiche descriptive du critère : réutilisation des zones précédemment construites ou contaminées « Greyfield land » (Source : Auteur,2023)

Nous avons classé le Maroc en deux zones selon la population urbaine, donc les grandes villes marocaines où le taux d'urbanisation élevé, nous exigeons un pourcentage élevé de l'indicateur de performance pour pousser les parties prenantes à choisir de réutiliser des sites abandonnés ou des friches industrielles. Ces pourcentages ont été choisis selon les exigences des autres systèmes et des discussions structurées avec les experts (1 expert et 4 enseignants-chercheurs). Peut-être dans des cas, nous avons exigé des seuils des performances élevés ou irréalisables, cela peut être corrigé après la période d'essai et la mise en application du référentiel BuSAF ; comme il a été montré dans l'étude comparative que les systèmes certification subissent un processus de révision périodique et une stratégie d'amélioration continue.

2.6. Résumé

Nous avons structuré le référentiel BuSAF en trois niveaux : les trois piliers de durabilité, les catégories et les sous-catégories. Lors des deux tours du questionnaire de la technique Delphi, les experts des bâtiments verts ont priorisé 7 catégories environnementales, 3 catégories économiques et 3 catégories sociales qui sont identifiées comme des aspects clés de la durabilité des bâtiments résidentiels. L'accent est mis sur le pilier environnemental, qui est subdivisé en 29 sous-catégories pour une évaluation plus détaillée. Chaque sous-catégorie a été évaluée à l'aide des critères d'évaluation. Pour ce faire, une échelle de notation de -1 à 5 est utilisée, où chaque niveau de performance est associé à des seuils prédéfinis. Ces seuils ont été déterminés en se basant sur la réglementation nationale et internationale. Le résultat de ce chapitre est la réalisation de 49 fiches descriptives pour chaque critère d'évaluation que correspondant. Ces fiches incluent des informations telles que la législation nationale encadrée du chaque critère, la phase d'évaluation spécifique, le type de critère et d'indicateur, ainsi que la méthode de calcul ou d'évaluation appropriée.

Dans la dernière étape, nous élaborons un système de pondération du référentiel, comme montré dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3 : Système de pondération du référentiel BuSAF(Env)

3.1. Introduction

Ce chapitre vise à personnaliser le système de pondération priorise les catégories et sous-catégories d'évaluation de la durabilité environnementale du BuSAF, en déterminant leur poids en fonction de leur importance relative. La pondération des items d'un GBRS peut prendre deux formes : directe par les coefficients de pondération pour chaque catégorie et sous-catégorie, comme le cas du référentiel BREEAM au niveau des catégories, ou indirecte, en considérant le nombre de points possible pour chaque catégorie. A titre exemple, le référentiel LEED propose 10 crédits pour la catégorie « Sustainable Sites », tandis que la catégorie « Energy & Atmosphere » s'évalue sur 33 crédits d'un total de 100 crédits du référentiel. Nous avons choisi une échelle de pointe échelonnée d'évaluation de -1 à 5 standard pour tous les critères. Nous priorisons les items par une pondération directe par un poids de chaque item du référentiel BuSAF(Env). Pour ce faire, la méthode d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) est une méthode qui implique une consultation avec des professionnels et des experts du domaine, comme la méthode de Delphi. L'analyse approfondie des pondérations permet d'identifier les domaines qui nécessitent une attention particulière et en favorisant une approche d'évaluation plus équilibrée et holistique de la durabilité. A la fin de ce chapitre, nous proposons la procédure d'évaluation et la mise en déploiement du référentiel BuSAF dans le secteur du bâtiment.

3.2. Système de pondération applicable au BuSAF(Env)

3.2.1. Application de la méthode AHP

Analyse Hiérarchique des Procédés est une méthode d'aide à la décision développée par Thomas Saaty dans les années 1970. Elle est largement utilisée pour résoudre des problèmes complexes impliquant des critères multiples et des jugements subjectifs [258]. Le poids accordé à chaque item (catégorie et sous-catégorie) dépend de la comparaison par paire du panel d'experts. Le processus de la méthode de l'AHP est en quatre étapes principales (Figure 52), qui comprend la structure hiérarchique du système d'évaluation BuSAF(Env), les comparaisons par paire, calcul des poids relatifs à chaque item, la vérification de la cohérence et la synthèse des résultats [259]. Cette méthode présente des inconvénients tels qu'une exigence de calcul élevée relative au nombre de données, une nature subjective et le fait qu'elle repose sur la perception traduite en jugement numérique. En particulier un grand nombre de paires de comparaisons peut être requis nécessitant alors des calculs fastidieux [260], mais bien que cet outil de la prise de décision multicritères ne soit pas sans défaut, il est très puissant si on l'utilise de manière appropriée [261].

3.2.2. Elaboration de la hiérarchie

Le référentiel BuSAF comprend trois niveaux hiérarchiques, comme montre la figure 46. Le premier niveau correspond aux trois piliers de la durabilité, le deuxième aux sept catégories et le troisième aux sous-catégories. Le panel d'experts a été sélectionné à partir de la liste des participants au questionnaire de Delphi, où 25 experts acceptaient de participer. Les études similaires comme Wu *et al.* (2012)[262] ,Vyas *et al.* (2019)[13] et Serda *et al.* (2022)[106] ont sélectionné entre 10 et 100 experts. Le logigramme (Figure 52) présente les étapes que nous avons suivies.

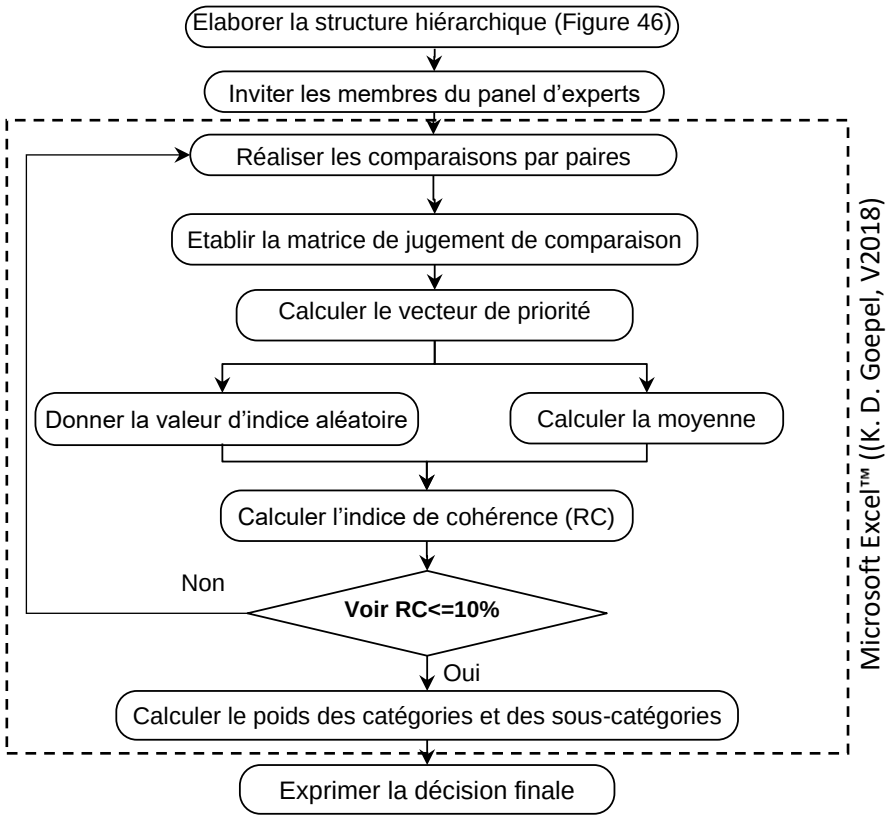


Figure 52: Processus de la pondération par la méthode AHP [259]

3.2.2.1 Matrice de la comparaison par paires

La comparaison par paire à chaque niveau de la hiérarchisation présente une étape clé dans la méthode AHP. Le tableau 31 montre l'exemple de la comparaison par paires de la catégorie « Site et écologie » avec les autres catégories du modèle BuSAF(Env) sur une échelle de neuf points recommandés par Saaty, les chiffres 3, 5, 7 et 9 représentants les niveaux d'importance suivants : modérée, forte, très forte et absolument plus importante. Les experts interrogés peuvent choisir un score intermédiaire pour évaluer les niveaux d'importance tels que 2, 4, 6 et 8. Le chiffre 1 indique que les deux items en même importance.

Tableau 31: Exemple d'une comparaison par paires (Catégorie : Site et écologie) (Source : Auteur,2023)

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Site et écologie (SE)																		Efficacité énergétique (EE)
Site et écologie																		Eau (E)
Site et écologie																		Matériaux de construction (MC)
Site et écologie																		Gestion des déchets solides (GD)
Site et écologie																		Pollution (P)
Site et écologie																		Gestion des risques (GR)

Après la comparaison, la matrice de comparaison par paires s'établit comme suit : A= $\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$.

Le tableau 32, montre le résultat de la matrice de la comparaison par paires les sept catégories environnementales du participant N°1.

Tableau 32 : Matrice de comparaison par paires (participant N°1) (Source : Auteur,2023)

	SE	**EE**	**E**	**MC**	**GD**	**P**	**GR**
SE	1	1/4	1/3	2	2	1/2	1
EE		1	2	4	2	3	3
E			1	6	5	4	7
MC				1	3	2	1/3
GD					1	2	1/2
P						1	1/3
GR							1

L'entrée de la matrice est le niveau d'importance relative d'un élément par rapport à l'autre. Pour le triangle supérieur droit de la matrice (ligne pointillée), (1,1/4, 1/3, etc.) dois être défini par les membres du panel d'expert sur l'échelle de Saaty, tandis que le triangle inférieur gauche de la matrice est l'inverse du triangle supérieur : $1/a_{ji}$. Il est essentiel de noter que les valeurs diagonales de la matrice sont toutes égales à 1, ce qui indique que le poids des catégories par rapport à lui-même est toujours de 1. Cette valeur de 1 peut se retrouver dans les autres cases de la matrice lorsque les jugements sont égaux comme pour les catégories « Gestion des déchets solides » et « Gestion des risques » considérées comme également pertinentes par l'expert N° 1 (Tableau 32).

La méthode AHP se base sur un groupe d'expert pour élaborer le système de pondération. Ainsi, pour établir la matrice de la comparaison du groupe, Kumanayake *et al.* (2017)[263] ont proposé deux façons de produire une décision de groupe. La première méthode implique que les membres du panel se réunissent et génère un consensus autour de leur opinion. Cette méthode est difficile à appliquer en raison de la situation géographique et des agendas des membres du panel d'experts. L'autre méthode utilise une moyenne géométrique pour combiner les matrices de comparaison individuelles. Aczél *et al.* (1983)[264] ont démontré que la moyenne géométrique était une méthode appropriée pour combiner l'opinion individuelle en jugement de groupe dans AHP plutôt que la moyenne

arithmétique. Car, elle est moins sensible aux valeurs les plus extrêmes d'une série de données par rapport à la moyenne arithmétique, donnant ainsi une estimation de la tendance centrale et conservant la réciproque de la matrice de la comparaison. Supposons qu'il y ait k experts qui ont rempli le questionnaire de la pondération pour les n items. Donc la matrice de comparaison de groupe est la suivante :

$$A=\begin{bmatrix} \sqrt[k]{{a_{11}}^1 \times {a_{11}}^2 \times \ldots \times {a_{11}}^k} & \cdots & \sqrt[k]{{a_{1n}}^1 \times {a_{1n}}^2 \times \ldots \times {a_{1n}}^k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt[k]{{a_{n1}}^1 \times {a_{n1}}^2 \times \ldots \times {a_{n1}}^k} & \cdots & \sqrt[k]{{a_{nn}}^1 \times {a_{nn}}^2 \times \ldots \times {a_{nn}}^k} \end{bmatrix}$$

La matrice de la comparaison du deuxième niveau de la hiérarchisation BuSAF(Env) (les catégories) par les participants à cette étude est présentée ainsi dans le tableau 33.

Tableau 33 : Matrice de comparaison par paire (15 participants) (Source : Auteur,2023)

	SE	EE	E	MC	GD	P	GR
SE	1.00	0.51	0.63	1.47	1.77	1.13	1.24
EE	1.82	1.00	1.33	1.63	2.93	2.13	2.54
E	1.59	0.75	1.00	1.77	1.87	1.61	2.09
MC	0.68	0.61	0.57	1.00	2.24	1.36	1.25
GD	0.57	0.34	0.54	0.45	1.00	1.00	0.64
P	0.89	0.47	0.62	0.74	1.00	1.00	0.88
GR	0.81	0.39	0.49	0.80	1.55	1.14	1.00
Somme	7.34	4.08	5.17	7.86	12.36	9.37	9.63

3.2.2.2 Calcul du coefficient de pondération

Avant de calculer le poids des catégories, la normalisation de la matrice de comparaison par paires du groupe d'experts doit être effectuée, ce qui se calcule en deux étapes :

- La valeur totale de chaque colonne de la matrice de comparaison par paires (Tableau 33) est calculée, par exemple pour la catégorie « Site et écologie » (SE) égale 7.34.
- En divisant chaque valeur de la matrice de comparaison du panel par la somme des valeurs de chaque colonne, exemple la première cellule du tableau 34 : 1 ÷ 7.34 = 0.14.

En conséquence, une matrice de comparaison par paires normalisées a été créée (Tableau 34). Le coefficient de pondération est déterminé par la moyenne de la ligne de chaque catégorie. Avec le même exemple de la catégorie « Site et écologie », nous obtenons : (0.14+0.13+0.12+0.19+0.14+0.12+0.13) ÷ 7= 0.137 soit 13.70 %

Tableau 34: Normalisation de la matrice AHP des sept catégories (Source : Auteur,2023)

	SE	EE	E	MC	GD	P	GR	Poids (moyenne)
SE	0.14	0.13	0.12	0.19	0.14	0.12	0.13	13.70 %
EE	0.25	0.25	0.26	0.21	0.24	0.23	0.26	24.10 %
E	0.22	0.18	0.19	0.23	0.15	0.17	0.22	19.40 %
MC	0.09	0.15	0.11	0.13	0.18	0.14	0.13	13.40 %
GD	0.08	0.08	0.10	0.06	0.08	0.11	0.07	8.20 %
P	0.12	0.11	0.12	0.09	0.08	0.11	0.09	10.40 %
GR	0.11	0.10	0.09	0.10	0.13	0.12	0.10	10.80 %

3.2.2.3 Test de cohérence

Procéder à des calculs du « Rapport de cohérence » (CR) garantit que les notes de préférence sont cohérentes. La plage de CR acceptable doit être inférieure ou égale à 0.10. Si CR est supérieur à cette valeur seuil, la comparaison par paires doit être révisée [265]. Pant et *al.* (2022)[265] ont recommandé de suivre les étapes suivantes pour calculer le rapport de cohérence :

- Chaque valeur de la première colonne (Tableau 32) multipliée par le poids de la catégorie qu'il représente et la même chose a été faite pour les colonnes restantes.
- Les valeurs des lignes ont été additionnées pour obtenir un vecteur de valeur appelé « Somme pondérée » (Tableau 35).
- La somme pondérée de chaque élément est divisée sur le poids de la catégorie.
- λ_{max} : C'est la somme du rapport de la somme pondérée et le poids divisé par le nombre d'éléments.

Tableau 35: Exemple de calcul λ (max) pour le participant N° 1 (Source : Auteur,2023)

	0.14	0.24	0.19	0.13	0.08	0.10	0.11			
	SE	**EE**	**E**	**MC**	**GD**	**P**	**GR**	**Somme pondérée**	**Poids**	**Somme ÷ poids**
SE	0.14 (1×0.14)	0.12 (0.50×0.24)	0.063	0.26	0.16	0.005	0.11	0.858	0.14	0.98 ÷ 0.14 = 7
EE	0.56 (4×0.14)	0.24	0.26	0.22	0.24	0.22	0.27	1.70	0.24	7.07
E	0.22	0.18	0.19	0.24	0.15	0.17	0.23	1.38	0.19	7.09
MC	0.09	0.15	0.11	0.13	0.18	0.14	0.13	0.94	0.13	7.07
GD	0.08	0.08	0.10	0.06	0.08	0.10	0.07	0.58	0.08	7.05
P	0.12	0.11	0.12	0.10	0.08	0.10	0.09	0.73	0.10	7.06
GR	0.11	0.09	0.09	0.11	0.13	0.12	0.11	0.76	0.11	7.07
									Somme	49.41
									λ(max)	49.52/7 = **7.05**

- Ensuite, C.I. est l'indice de cohérence se calculer par la formule : C.I. = $\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$; n=nombre d'élément (7 catégories), donc C.I. = $\frac{7.05-7}{7-1}$ = 0.0083
- Enfin, le rapport de cohérence, C.R. = $\frac{\text{C.I.}}{\text{R.I.}}$ Eq. 4

  Avec, R.I. est l'indice d'incohérence aléatoire pour n = 1, 2, 3,…, 15, est présenté dans le tableau 36 ci-dessous.

Tableau 36: Indice d'incohérence aléatoire (R.I.)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R.I.	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Donc : C.R. = $\frac{C.I.}{R.I.}$ = $\frac{0.0083}{1.32}$ = **<u>0.0063</u>** < 0.10 ; on conclut que les juges de pondération des sept catégories environnementales sont cohérents par le participant N° 1.

Nous avons effectué le reste du calcul de pondération à l'aide de la feuille Microsoft Excel™_K. D. Goepel, V2018 [266], après qu'elle a été vérifiée avec les résultats de nos calculs précédents. Les développeurs de cette feuille ont calculé l'incertitude associée aux pondérations afin d'obtenir des intervalles de confiance pour les résultats finaux par la simulation Monte Carlo [267].

3.2.3. Résultats de la pondération

Le questionnaire est préparé pour attribuer à chaque catégorie et sous-catégorie environnementale un niveau de priorité selon l'échelle de Saaty par des experts volontaires pour participer. La partie principale du questionnaire d'enquête est présentée à l'annexe (R). Le questionnaire contient soixante-douze comparaisons par paire, dont trois pour les piliers de durabilité (TBL), 21 comparaisons pour le deuxième niveau « Catégories » de BuSAF(Env) et 48 comparaisons pour les sous-catégories des sept catégories environnementales. Le questionnaire a été envoyé à 25 experts entre le 15 avril et le 30 mai 2023. Quatre réponses d'experts ont été rejetées parce que leur ratio de cohérence dépassait 0.10, tandis que 15 réponses ont été utilisées pour déterminer le poids des items de BuSAF(Env). La figure 53 présente les caractéristiques démographiques du panel d'experts. Ils sont issus de six professions distinctes et variées. Cette approche de consultation des experts a été recommandée par Ali *et al.* (2009)[16], qui ont souligné qu'un ensemble diversifié de participants clés devrait être impliqué dans le processus de développement d'outils d'évaluation des bâtiments verts.

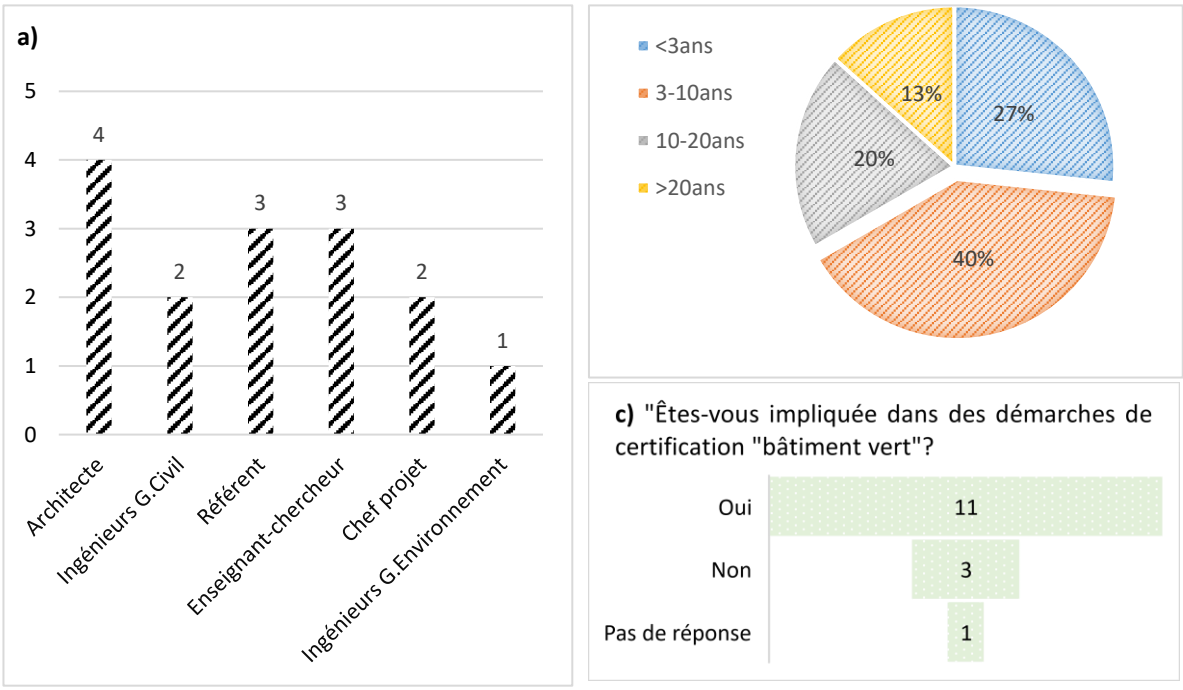


Figure 53: Données démographiques des experts a) : profils ; b) : années d'expérience) ; et c) : participation au GBRS (Source : Auteur,2023)

Les données recueillies auprès de chaque intervenant sont formées dans trois matrices carrées réciproques : matrice 3 × 3 pour les piliers et matrice 7 × 7 pour les catégories environnementales. Un exemple de matrice carrée formulée pour les 7 catégories environnementales basées sur le jugement

par un participant est présenté dans le tableau 36. La synthèse des comparaisons par paires au niveau des catégories, présentées à la figure 54, révèle que le système de pondération est organisé par ordre croissant, ce qui donne une image claire de la priorité des catégories environnementales. La catégorie « Efficacité énergétique » a été priorisée avec 24 % (+/-2) du poids, la catégorie « Eau » arrivant en deuxième position avec 19.50 % (+/-3.10). Viennent ensuite 13.90 % (+/-2.60) pour « Site et Ecologie », 13.30 % (+/-2.80) pour la catégorie « Matériaux de construction », 10.70 % (+/-1.20) pour « Gestion des risques » et 10.40 % (+/-1.50) pour la catégorie « Pollution ». La pondération la plus faible a été attribuée au catégorie « Gestion des déchets solides » avec 8.20 % (+/-1.60).

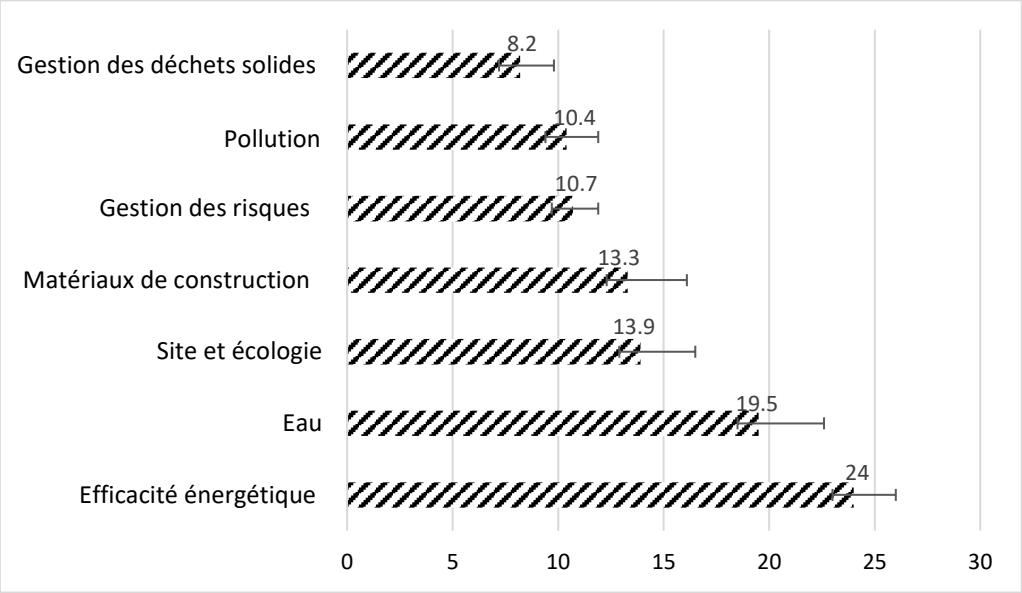


Figure 54 : Pondération des catégories BuSAF(Env) (Source : Auteur,2023)

Les deux catégories « Efficacité énergétique » et « Eau » ont le poids le plus élevé selon les experts, ce qui rejoint les préoccupations nationales sur l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment et est en lien avec les graves pénuries d'eau au Maroc. Ces résultats sont également les mêmes que celui identifié par d'autres référentiels dans la région MENA. Actuellement la priorité de la catégorie « Efficacité énergétique » est dans tous les systèmes de certification existants, cela montre l'influence des engagements internationaux dans le secteur du bâtiment vers la priorité d'efficacité énergétique sur les systèmes de certification nationale. Détaillons ces catégories en analysant les réponses pour les sous-catégories.

- Efficacité énergétique

« Efficacité énergétique » a été considérée comme la catégorie la plus importante dans toutes les référentiels, y compris le référentiel BuSAF. Le mixte énergétique du Maroc est constitué à plus de 80 % par des énergies fossiles. La pondération des sous-catégories a été obtenue comme montre le tableau 37. Le critère d'évaluation des stratégies d'orientation, ombrage et la protection solaire dans la sous-catégorie « EE.1. Conception passive » était classé en premier avec un poids de 33.87 % (+/-

6.07). Cela, indique l'importance d'exploiter les conditions climatiques du site, telles que l'ensoleillement abondant au Maroc, pour réduire la dépendance au système énergétique actif. Une conception bioclimatique du bâtiment, y compris le choix du terrain (climat, topographie, vent, etc.), l'orientation, la disposition des espaces, l'utilisation des protections solaires et des ouvertures, peuvent optimiser l'utilisation des ressources naturelles et minimiser les besoins en énergie.

La sous-catégorie « EE.2. Performance de l'enveloppe » est « Prérequis » souligne l'obligatoire d'une isolation efficace, de fenêtres à haut rendement énergétique et de techniques d'étanchéité à l'air. Cette pondération reflète la nécessité de maintenir un confort tout en réduisant les besoins en climatisation et en chauffage. Une bonne isolation par la laine de roche et du polystyrène de la toiture réduit l'énergie consommée de refroidissement comprise entre 63 % et 75 % selon les régions du Maroc [268].

Tableau 37: Pondération des sous-catégories « Efficacité énergétique » (Source : Auteur,2023)

Sous-catégorie	Poids	+/-
EE.1. Conception passive	33.87%	6.07%
EE.2. Performance de l'enveloppe	Prérequis	
EE.4. Utilisation des énergies renouvelables	28.63%	4.49%
EE.3. Efficacité des systèmes énergétiques	22.67%	4.13%
EE.5. Stratégie de gestion de l'énergie	14.83%	2.14%

L'exploitation des ressources en énergie renouvelables au Maroc a été priorisée par les experts avec un poids de 28.63 % (+/-4.49 %) pour promouvoir l'intégration des énergies renouvelables dans les bâtiments résidentiels au Maroc. Par conséquent, une attention supplémentaire devrait être accordée aux gisements en énergies renouvelables. Cela peut inclure l'utilisation de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques pour l'eau chaude sanitaire et la production d'électricité, ainsi que d'autres sources d'énergies renouvelables adaptées au contexte marocain, telles que les micro-éolienne, géothermique et la biomasse. Malgré la capacité de l'énergie éolienne au nord du Maroc, l'implantation des micro-éoliennes n'a pas été développée. Une autre voie de production d'électricité suggérée est la production de chaleur et d'électricité par la géothermie et de géocooling avec des opportunités à faible coût. Par exemple, les régions de Berkane et Oujda ont des gradients géothermiques plus de 35°C/Km [269].

D'autre part, les experts ont classé la sous-catégorie « EE.3. Efficacité des systèmes énergétique » en quatrième place avec un poids de 22.67 %. Le système d'éclairage contribue à 40 % de la consommation finale des bâtiments résidentiels au Maroc [270], donc leur optimisation est primordiale pour une efficacité globale du bâtiment. Les systèmes énergétiques et les équipements électroménagers performants, avec des étiquetages au-delà de classe B, les systèmes de climatisation-ventilation et de chauffage et le système de circulation (ascenseur) doivent être pris en considération dans l'efficacité énergétique du bâtiment résidentiel.

Finalement, la sous-catégorie « EE.5. Stratégie de gestion de l'énergie » (14.83 %) : bien qu'elle ait une pondération relativement plus faible, elle souligne néanmoins l'importance de mettre en place des stratégies de gestion de l'énergie efficaces pour optimiser les performances énergétiques des bâtiments résidentiels. Cela peut inclure l'utilisation de systèmes de contrôle et de régulation intelligents, la sensibilisation des occupants à la conservation de l'énergie, ainsi que des mesures de suivi et de surveillance la consommation énergétique.

- Eau

La catégorie « Eau » est classée très importante par les experts à une différence de poids de 4.50 % par rapport à la catégorie de l'efficacité énergétique. Cela démontre que l'efficacité hydrique dans la conception des bâtiments est essentielle pour parvenir à des bâtiments durables au Maroc. Cela est une réponse à la situation actuelle de stress hydrique au Maroc et la distribution de l'eau inégale entre les régions du Maroc. Les régions de sud souffrent des pénuries sévères en eau, les précipitations dépassant rarement 100 mm par an.

Tableau 38: Pondération des sous-catégories « Eau » (Source : Auteur,2023)

Sous-catégorie	Poids	+/-
E.1. Performance l'utilisation de l'eau à l'intérieur	32.20%	4.93%
E.2. Performance l'utilisation de l'eau extérieure	27.75%	1.21%
E.3. Sources d'eau alternatives	24.49%	4.42%
E.4. Stratégie de gestion de l'eau	15.57%	2.48%

Les experts reconnaissent la nécessité de rationaliser l'usage de l'eau avec un poids de 32.20 % (+/- 4.93) à l'intérieur du bâtiment résidentiel. Cela se fait avec des appareils sanitaires (robinets, pommes de douche et les toilettes) à faible consommation d'eau et un réseau de raccordement fiable (Tableau 38). Également, à l'extérieur du bâtiment par la sous-catégorie « E.2. Performance d'utilisation de l'eau extérieure » (27.75 %) : le poids attribué à cette sous-catégorie souligne l'importance de la gestion de l'eau à l'extérieur des bâtiments résidentiels, notamment dans les espaces paysagers, les jardins et ceux y présentant la fontaine et la piscine. L'une des solutions efficaces suggérées était de créer des jardins de pluie dans le paysage extérieur, utiliser des espèces indigènes et un xéropaysage, l'utilisation de systèmes d'arrosage efficaces et la collecte des eaux pluviales pour l'arrosage et aussi un système de recirculation des eaux de piscine et de fontaine.

La sous-catégorie « E.3. Sources alternatives d'eau » (24.49 %) : le poids attribué à cette sous-catégorie met en évidence l'importance de diversifier les sources d'eau utilisées dans les bâtiments résidentiels. Cela peut inclure l'utilisation de sources alternatives telles que l'eau de pluie collectée à partir des toits, leur stockage et leur utilisation pour les usages non potables tels que l'arrosage et le nettoyage. De plus, l'utilisation d'eaux recyclées provenant de traitements des eaux grises, même des eaux usées noires dans le cas où le bâtiment a un système de traitement des eaux usées individuelles.

La dernière sous-catégorie liée à la gestion de l'eau à l'intérieur et extérieure du bâtiment (E.4. Stratégie de gestion de l'eau) est avec un poids de 15.57 %. Elle évalue les différentes procédures appliquées pour contrôler et suivre la demande en eau, telles que l'établissement d'un plan de suivre la consommation de l'eau, système de détection des fuites et les accompagne de sensibilisation pendant la phase d'occupation.

- Site et écologie

La catégorie « Site et de l'écologie » concerne le site et tous ses aspects connexes, exprimés en cinq sous-catégories, comme le montre le tableau 39. Le panel d'experts a convenu que le choix de la parcelle à construire est associé à réduire l'utilisation des terres vierges, améliorer la biodiversité locale et favoriser la perméabilisation du site. Tout en veillant à ce que les bâtiments soient correctement connectés aux infrastructures de base et aux services locaux.

Tableau 39: Pondération des sous-catégories « Site et écologie » (Source : Auteur,2023)

Sous-catégorie	Poids	+/-
SE.1. Site du projet	33.48%	5.91%
SE.2. Ecologie du site	29.06%	3.63%
SE.4. Atténuation des ilots de chaleur	20.73%	2.58%
SE.5. Infrastructure adéquate	9.05%	1.88%
SE.3. Gestion des eaux pluviales	7.68%	0.35%

Les experts estiment que le site et l'emplacement du projet sont des considérations primordiales dans les procédures de construction avec un poids de 33.48 % (+/5.91). La construction durable commence par le choix d'un emplacement approprié en référence aux documents d'urbanisme. Au-delà des plans d'aménagement, le choix du site doit être au loin d'un site à une valeur écologique. La sous-catégorie « SE.2. Ecologie du site » (29.06 %) met l'accent sur la préservation et la promotion de la biodiversité et des écosystèmes locaux. Il est important de préserver les caractéristiques naturelles du site, telles que les arbres existants, les habitats fauniques, etc. De plus, la conception paysagère doit améliorer la biodiversité locale par l'implantation des espèces indigènes dans des espaces du jardin ou/et sur toit des bâtiments résidentiels et la création d'habitats pour la faune locale.

« SE.4. Atténuation des îlots de chaleur » était une autre sous-catégorie mise en avant par les experts. Ils jugent que l'augmentation de la surface construite et le manque des jardins dans les bâtiments résidentiels sur tout le type maison marocaine moderne avaient accru l'effet d'îlot de chaleur au niveau des villes marocaines. Une étude menée par Fathi *et al.* (2019)[271] ont analysé les effets des îlots de chaleur d'urbanisme de 23 villes selon de 12 régions du Maroc, les résultats ont démontré que les villes sont plus chaudes que les périphériques ruraux de 1.51 °C pendant la journée. Ils ont suggéré trois stratégies pour atténuer les effets d'îlots de chaleur, en particulier dans les zones résidentielles de la mégapole. Ces mesures étaient d'avoir plus de toits verts et d'espaces de végétation dans les bâtiments et les espaces résidentiels.

La sous-catégorie « SE.5. Infrastructure adéquate » concerne la disponibilité et la qualité de l'infrastructure nécessaire pour construire le projet. Cela peut inclure l'accès à des réseaux d'eau potable, réseau d'assainissement, électricité, etc., afin d'éviter les impacts environnementaux causés par la construction des nouvelles infrastructures.

La sous-catégorie « SE.3. Gestion des eaux pluviales » en dernière avec un poids de 7.68 % (+/-0.35) s'intéresse à la gestion du ruissellement des eaux pluviales, favoriser la perméabilisation du site, contrôler l'érosion du sol et la mise en place de système de drainage.

- Matériaux de construction

Cette catégorie évalue l'utilisation efficace des matériaux de construction, intégrée des matériaux secondaires et les procédés de construction appropriés (Tableau 40). Selon les experts, les sous-catégories les plus cruciales étaient le choix des matériaux à faible impact sur l'environnement (MC.1. Impact environnemental des matériaux de construction) avec un poids de 27.12 % (+/-3.84). Il est donc, essentiel de considérer les caractéristiques environnementales des matériaux utilisés, tels que leur énergie grise, leurs émissions de gaz à effet de serre, leur potentiel de déchets et leur contribution à la pollution. Les matériaux à faible impact environnemental, tels que ceux à faible teneur en CO_2 ou à contenu recyclé, doivent être privilégiés. C'est pour cela que la sous-catégorie « MC.2. Matériaux de construction avec un contenu recyclé » a été classée en deuxième, avec un poids de 21.34 %. L'utilisation de matériaux recyclés contribue à réduire la demande de nouvelles ressources naturelles, la consommation d'énergie et les déchets.

Tableau 40: Pondération des sous-catégories « Matériaux de construction » (Source : Auteur,2023)

Sous-catégorie	Poids	+/-
MC.1. Impact environnemental des matériaux de construction	27.12%	3.84%
MC.2. Matériaux de construction avec contenu recyclé	21.34%	2.54%
MC.3. Matériaux de construction locaux	20.99%	1.03%
MC.4. Approvisionnement responsable des matériaux de construction	15.86%	1.20%
MC.5. Procédés de construction appropriées	14.70%	1.62%

La sous-catégorie « MC.3. Matériaux de construction locaux » (20.99 %) valorise l'utilisation de matériaux de construction disponibles localement, ce qui réduit les impacts environnementaux associés au transport. L'utilisation de matériaux provenant de sources locales favorise ainsi le soutien de l'économie local (« Zellige », « Tadelakt », ect.). Cela inclut l'utilisation de pierre, de terre cuite, de bois local, de paille, etc., qui sont adaptés au contexte local du Maroc.

La sous-catégorie « MC.4. Approvisionnement responsable des matériaux » représente un poids de 15.86 %. Il évalue des pratiques d'achat pendant la phase d'approvisionnement en matériaux de construction provenant de sources responsables. Tels que des fournisseurs des matériaux de construction et des produits certifiés pour leurs pratiques durables. Cela implique la traçabilité des matériaux achetés jusqu'au point de production et tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

Finalement, la sous-catégorie « MC.5. Procédés de construction appropriés » était classée en dernière avec un poids de 14.70 %. Elle se concentre sur les méthodes et les techniques de construction économes en énergie, l'optimisation des matières premières et des déchets de construction et les pratiques pour éviter des gaspillages des matériaux de construction.

- Gestion des risques

Le Maroc est confronté à plusieurs risques naturels, on peut citer les inondations accentuées par les changements climatiques, l'activité sismique et les pandémies comme celle de la COVID-19, ainsi que les risques liés aux tempêtes de sable dans les régions du sud et l'Est du Maroc. Les régions du Nord et d'Agadir au Maroc sont principalement exposées au risque de tremblement de terre, bien que ces événements soient moins fréquents. Le Nord est en plein essor économique, tandis qu'Agadir est l'un des centres touristiques les plus importants du pays. A la date du 19 septembre 2023, la région d'Al Haouz a été frappée par un tremblement de terre, qui a entraîné la perte de plus de 2800 vies et la destruction de 600 maisons. Assurer la résilience des bâtiments face aux risques naturels est une responsabilité fondamentale des pouvoirs publics, mais aussi de l'ensemble des acteurs sociaux et des entreprises, pour garantir la sécurité et le bien-être.

Tableau 41: Pondération des sous-catégories « Gestion des risques » (Source : Auteur,2023)

Sous-catégorie	Poids	+/-
GR.1. Risques des aléas climatiques	46.01%	3.17%
GR.2. Gestion du risque sismique	41.63%	2.87%
GR.3. Risque microbiologique	12.36%	0.85%

La sous-catégorie « GR.1. Risques des aléas climatiques » 46.01 % (+/-3.17) accorde une pondération élevée à la gestion des risques liés aux aléas climatiques. Il est important de concevoir les bâtiments de manière à résister aux conditions climatiques extrêmes et à réduire les dommages potentiels. Des mesures telles que la conception de systèmes de drainage approprié, la protection contre les infiltrations d'eau, la résistance au vent, l'isolation thermique et la ventilation adéquate peuvent être prises pour atténuer les risques.

« GR.2. Gestion du risque sismique » (41.63 %) : Cette sous-catégorie met l'accent sur l'évaluation du risque sismique pour assurer la sécurité des bâtiments et de leurs occupants. Cela implique l'utilisation de techniques de construction résiste au sismique, telles que l'utilisation de structures renforcées et de systèmes de fondation appropriés. Les normes parasismiques et les réglementations locales doivent être respectées pour minimiser les dommages potentiels causés par les tremblements de terre.

En dernière, sous-catégorie « GR.3. Risques microbiologiques » (12.36 %) évalue la prise en considération les risques liés aux virus et les pandémies. Cela, il a été remarqué pendant la période du COVID19. Cela peut inclure la prévention des problèmes de qualité de l'air intérieur, tels que la moisissure, les allergènes et les virus. Des mesures telles que l'utilisation de matériaux de construction

non toxiques, la mise en œuvre de systèmes de ventilation appropriés, le contrôle de l'humidité et le maintien de bonnes pratiques d'hygiène peuvent être prises pour réduire les risques microbiologiques.

- Pollution

Il est clair que les deux sous-catégories « P.1. Contribution au changement climatique » et « P.2. Pollution des eaux » (Tableau 42) ont été jugées importantes avec un poids de 39.25 % et 31.82 %. Ces deux sous-catégories évaluent l'impact du bâtiment pendant la phase d'utilisation sur l'environnement en termes des émissions des gaz à effet de serre et la production des eaux usées. La troisième sous-catégorie s'intéresse aux démarches ont été réalisées pour avoir un chantier sans pollution.

Tableau 42: Pondération des sous-catégories « Pollution » (Source : Auteur,2023)

Sous-catégorie	Poids	+/-
P.3. Contribution au changement climatique	39.25%	3.41%
P.4. Pollution des eaux	31.82%	3.06%
P.2. Pollution des activités de construction	28.93%	1.64%
P.1. Protection de la couche d'ozone	Prérequis	

La sous-catégorie « P.3. Contribution aux changements climatiques » 39.25 % (+/-3.41) accorde une pondération élevée à l'évaluation de la contribution du bâtiment aux émissions de gaz à effet de serre. Il est crucial de minimiser l'empreinte carbone du bâtiment en adoptant des stratégies de conception écoénergétique, en utilisant des matériaux à faibles émissions de carbone, en optimisant l'efficacité énergétique, en intégrant des systèmes de production d'énergie renouvelable et en favorisant une gestion efficace de l'énergie.

« P.4. Pollution des eaux » (31.82 %) : Cette sous-catégorie concerne la réduction des quantités des eaux usées générées pendant la phase d'occupation. Alors que la sous-catégorie « P.2. Pollution des activités de construction » (28.93 %) met l'accent sur la réduction des impacts négatifs pendant la phase de la construction sur l'environnement, tels que la pollution de l'air, la génération de déchets et les émissions de gaz à effet de serre. Pour réduire la pollution associée aux activités de construction, il est important de mettre en œuvre des pratiques de gestion des déchets, d'utiliser des équipements à faible émission et d'adopter des méthodes de construction à faible impact environnemental.

La dernière sous-catégorie « P.1. Protection de la couche d'ozone » est un critère obligatoire « Prérequis », évalue l'impact des matériaux et les équipements de réfrigération utilisés sur l'appauvrisse de la couche d'ozone. Il est important de promouvoir l'utilisation des produits à faible potentiel de déplétion de l'ozone.

- Gestion des déchets solides

Au Maroc, la gestion des déchets de construction et de démolition est considérée comme l'un des secteurs prioritaires dans la gestion des déchets urbains. Selon le département de l'Environnement, une quantité d'environ 41.90 millions de tonnes de déchets est générée chaque année par les activités de construction et de démolition, avec une tendance à la hausse [272]. La plupart de ces déchets finissent dans des décharges contrôlées et non contrôlées ou sont utilisés pour combler des carrières abandonnées. Le département de l'Environnement identifie trois types de déchets de construction et de démolition : les déchets inertes, les déchets non dangereux et les déchets dangereux. Les déchets inertes représentent 97.30 % du volume total des déchets produits, les déchets non dangereux représentent 2.40 % et les déchets dangereux représentent 0.80 % [272]. Ces chiffres soulignent la nécessité d'améliorer la gestion des déchets de construction et de démolition au Maroc. En mettant l'accent sur le tri, la réutilisation et le recyclage pour réduire l'impact environnemental de ces déchets et promouvoir une économie circulaire dans le secteur de la construction. A l'heure actuelle, au Maroc, le tri est rarement réalisé sur site. Par conséquent, les experts ont suggéré que la gestion des déchets de construction soit prise en compte dans la construction durable des bâtiments résidentiels. Alors, pendant la phase d'occupation du bâtiment, en moyenne les habitants produisent 0.75 Kg/Hab/jr des déchets ménagers aux décharges municipales.

Tableau 43: Pondération des sous-catégories « Gestion des déchets solides » (Source : Auteur,2023)

Sous-catégorie	Poids	+/-
GD.2. Gestion des déchets ménagers	42.41%	3.12%
GD.3. Valorisation des déchets organiques	36.93%	2.71%
GD.1. Gestion des déchets de construction	20.67%	1.52%

Avec cela, les experts ont priorisé la sous-catégorie « GD.2. Gestion des déchets ménagers » avec un poids 42.41 % (+/3.12) qui met l'accent sur la gestion des déchets générés par les occupants des bâtiments résidentiels. Une gestion efficace des déchets ménagers implique la collecte sélective, le tri des déchets recyclables, la mise en place de points de collecte appropriés, la sensibilisation des occupants à la réduction des déchets et la promotion de pratiques de recyclage et de compostage.

« GD.3. La valorisation des déchets organiques » (36.93 %) : Cette sous-catégorie accorde une pondération élevée à l'évaluation et à la valorisation des déchets organiques in-situ, tels que les déchets de cuisine et de jardin, comme le compostage. Cela permet de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge et de produire du compost. La dernière sous-catégorie « GD.1. Gestion des déchets de construction » (20.67 %) accorde à l'évaluation et à la gestion des déchets de construction générés pendant la construction et la rénovation.

En résume les résultats de la pondération et les points possibles pour chaque sous-catégorie du référentiel BuSAF(Env) présentés dans le tableau 44. Nous avons exigé deux sous-catégories et deux

critères obligatoires qui ont été déterminés comme « Prérequis » et doivent être donc atteints et 25 points de bonus d'innovation avec une pondération de 10 %.

Tableau 44 : Système de pondération et de notation du BuSAF(Env) (Source : Auteur,2023)

Environnement		**Poids (%)**	**Points maximums** 150 + 25 points de bonus
SITE ET ECOLOGIE (SE)		**13.90%**	**35**
Sous-catégories	Critères d'évaluation		
SE.1. Site du projet	Sélection appropriée du site	33.48	Prérequis
	Réutilisation des zones précédemment construites ou contaminées « Greyfield land ».		5
	Proximité des commodités		5
SE.2. Ecologie du site	Gestion de l'écologie du site	29.06	5
	Végétalisation des surfaces		5
SE.3. Gestion des eaux pluviales		7.68	5
SE.4. Atténuation des îlots de chaleur	Réduction des îlots de chaleur de Hardscape.	20.73	
	Réduction des îlots de chaleur sur les surfaces externes		5
SE.5. Infrastructure adéquate		9.05	5
EFFICACITE ENERGETIQUE (EE)		**24%**	**20**
EE.1. Conception passive		33.87	5
EE.2. Performance de l'enveloppe	Transfert de chaleur à travers les murs	Prérequis	
	Transfert de chaleur par les toits et les planchers		
	Rayonnement solaire à travers les fenêtres		
EE.3. Efficacité des systèmes énergétiques	Ventilation mécanique centralisée (VMC)	22.67	5
	Équipement de chauffage et de climatisation		
	Système d'eau chaude		
	Efficacité de l'éclairage		
	Performance des appareils électroménagers		
	Ascenseurs écoénergétiques (si présence)		
EE.4. Utilisation des énergies renouvelables		28.63	5
EE.5. Stratégie de gestion de l'énergie	Suivi de la consommation d'énergie	14.83	5
	Programme de maintenance des systèmes énergétiques		
	Sensibilisation à la conservation de l'énergie		
Bonus d'innovation		-	5
EAU (E)		**19.50%**	**25**
E.1. Performance d'utilisation de l'eau à l'intérieur		32.20	5
E.2.Performance d'utilisation de l'eau extérieure	Aménagement paysager économe en eau	27.75	5
	Efficacité du système d'arrosage		5
	Mettre en place des stratégies pour réduire la consommation d'eau des loisirs (si présente).		Prérequis
E.3. Sources alternatives d'eau	Récupération des eaux pluviales	24.48	5
	Réutilisation des eaux grises		
	Réutilisation des eaux usées traitées		
E.4. Stratégie de gestion de l'eau	Suivi de la consommation des ressources en eau	15.57	5
	Gestion des fuites d'eau		
	Sensibilisation à la conservation de l'eau		
Bonus d'innovation		-	5

(Continue)

MATERIAUX DE CONSTRUCTION (MC)	**13.30%**	**25**
MC.1. Impact environnemental des matériaux de construction	27.12	5
MC.2. Matériaux de construction avec contenu recyclé	21.34	5
MC.3. Matériaux de construction locaux	20.99	5
MC.4. Approvisionnement responsable des matériaux	15.85	5
MC.5. Procédés de construction approprié	14.70	5
Bonus d'innovation	-	5
GESTION DES DECHETS SOLIDES (GD)	**8.20%**	**15**
GD.1. Gestion des déchets de construction	20.67	5
GD.2. Gestion des déchets ménagers	42.40	5
GD.3. Valorisation des déchets organiques	36.93	5
Bonus d'innovation	-	5
POLLUTION (P)	**10.40%**	**15**
P.1. Protection de la couche d'ozone	Prérequis	
P.2. Pollution des activités de construction	28.93	5
P.3. Contribution au changement climatique	39.25	5
P.4. Pollution des eaux	31.82	5
GESTION DES RISQUES (GR)	**10.70%**	**15**
GR.1. Risques des aléas climatiques	46.01	5
GR.2. Gestion du risque sismique	41.63	5
GR.3. Risque microbiologique	12.36	5
Bonus d'innovation	-	5
INNOVATION	**10%**	**25**

On fait remarque que les coefficients de pondération des sous-catégories peuvent être ajustés dans le cas où un bâtiment ne s'applique pas les exigences d'une sous-catégorie particulière. Pour montrer ce point, prenons l'exemple l'évaluation d'une maison marocaine moderne qui ne dispose ni de jardin ni d'un toit vert. Dans ce cas, la sous-catégorie « E.2. Performance d'utilisation de l'eau extérieure » qui a un coefficient de pondération de 27.75 % ne s'applique pas au projet. En conséquence, les pondérations des autres sous-catégories (E.1, E.3, et E.4) de la catégorie « Eau » seront modifiées. Dans le chapitre suivant, nous examinerons plus en détail ce scénario spécifique pour expliquer comment ces ajustements sont effectués.

3.2.4. Comparaison entre BuSAF(Env) et les GBRS existants

Le poids des catégories environnementales considérées par les précédents GBRS et le BuSAF(Env) est comparé et illustré à la figure 55. La plupart des GBRS y compris BuSAF(Env) ont accordé une priorité plus élevée aux catégories « Efficacité énergétique » et la catégorie « Matériaux de construction ».

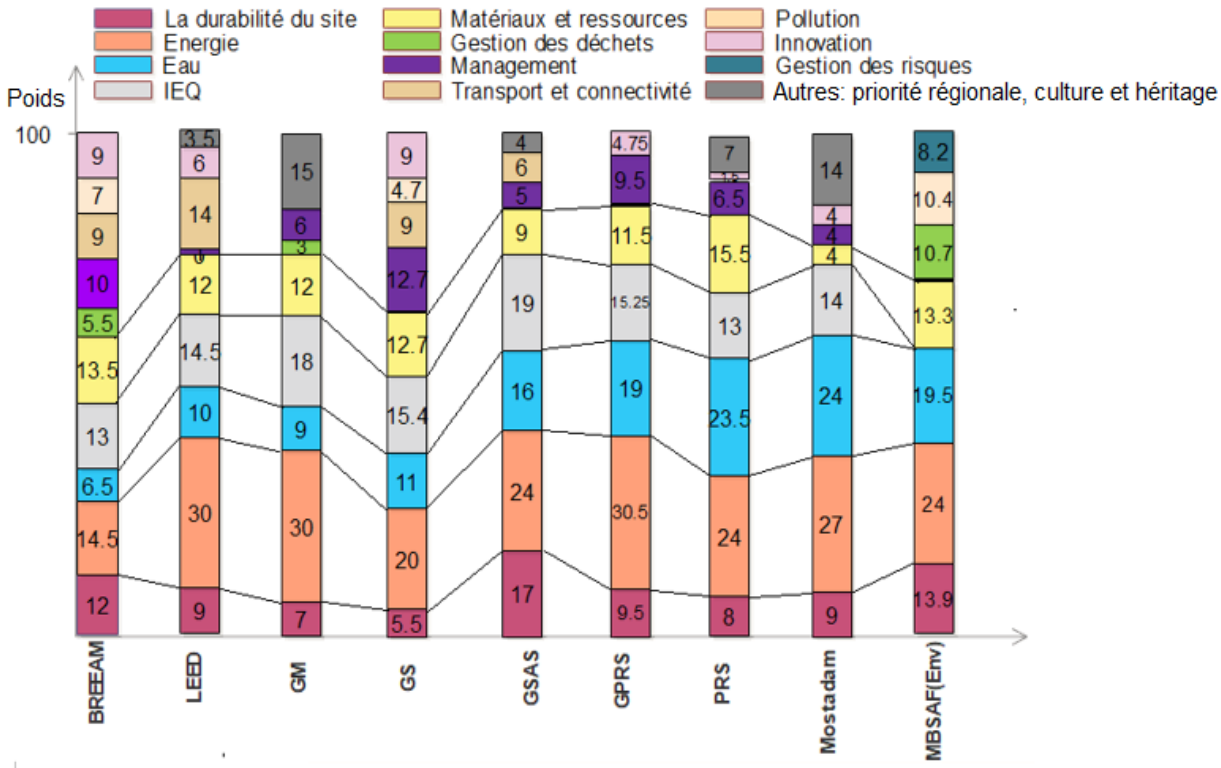


Figure 55: Comparaison du poids des catégories du BuSAF(Env) et les GBRS (Source : Auteur,2023)

La catégorie « Site durable » à sa place dans tous les systèmes de notation avec un poids varie entre 5.50 % et 17 %. La catégorie « Efficacité énergétique » de ces systèmes de certification a contribué le niveau de prioritaire le plus élevé, compris entre 14.30 % et 30 %. Tous les systèmes de notation couvrent l'efficacité de l'eau en tant que catégorie distincte avec un poids compris entre 6 % et 23.50 %. Comme pour GSAS, GPRS, PRS et BuSAF(Env) la catégorie « Eau » extrêmement importante par rapport aux autres systèmes de certification. La catégorie « Matériaux de construction » est identifiée comme une catégorie distincte par la plupart des GBRS, à l'exception du système de l'Arabie saoudite Mostadam, avec un poids compris entre 4 % et 13.30 %. Les systèmes de certification, à l'exception de BuSAF(Env), couvrent la catégorie « Qualité de l'environnement intérieur » comme une catégorie distincte avec un poids compris entre 13 % et 19 %. Cette catégorie a été classée dans le pilier social (BuSAF(Soc)) dans la catégorie « Santé et bien-être ». Toutes ces catégories représentent ensemble 60 % à 85 % du poids prioritaire, donnant ainsi la plus haute priorité à la dimension environnementale dans l'industrie des bâtiments résidentiels dans les différents contextes.

Les catégories « Pollution » et « Gestion des déchets » font partie de quelques systèmes de notation avec un poids compris entre 1.50 % et 10.70 %. Le nouveau référentiel BuSAF(Env) intègre des critères en relation avec la « Gestion des risques », notamment la prise en considération les aléas climatiques pendant la conception est l'exploitation des bâtiments et des préventions contre toute future pandémie. Cette catégorie est une nouveauté dans les GBRS, tandis que la question de l'adaptation

aux changement climatique est traitée par le référentiel BREEAM dans la catégorie « Innovation » (Wst 05 Adaptation to climate change).

Dans le même temps, à travers de cette comparaison, on constate que chaque référentiel hiérarchise différemment les aspects de performance des bâtiments résidentiels, selon les enjeux locaux de son pays. Il est donc important d'illustrer la pertinence de la contextualisation de BuSAF(Env) et sa divergence avec d'autres référentiels, qui démontrent que les autres GBRS ne sont pas appropriés dans le contexte marocain. Également, des preuves de l'importance des systèmes de pondération comme élément central de tout processus d'évaluation de la durabilité. Les critères ont donc été présentés comme un processus en plusieurs étapes, afin d'obtenir un niveau final de la durabilité.

3.3. Procédure d'évaluation des bâtiments par BuSAF

3.3.1. Processus d'évaluation des bâtiments par le BuSAF

Nous proposons une démarche d'évaluation des nouveaux bâtiments, le référentiel BuSAF suggère deux types de certification aux bâtiments résidentiels (bâtiments marocains modernes, les logements collectifs et les villas) : « Certification de la conception et de la construction » et « Certification finale de la durabilité ». Les étapes de certification se déroulent en trois étapes, comme le montre la figure 56.

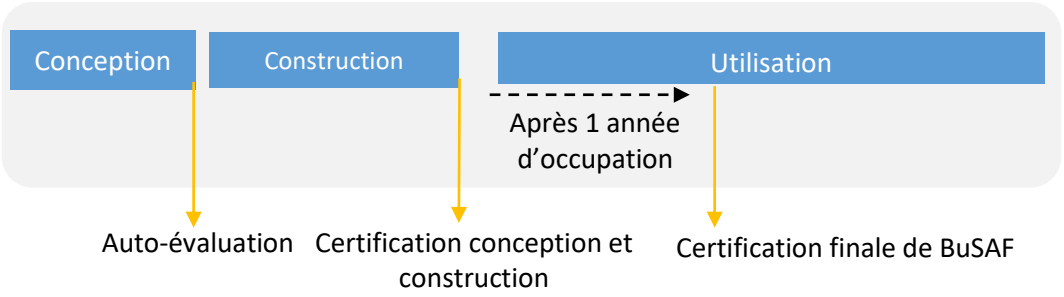


Figure 56: Processus de la certification BuSAF (Source : Auteur,2023)

- Phase de conception et de construction

L'auto-évaluation pendant la phase de la conception vise à évaluer si la conception du projet répond aux critères d'évaluation spécifiques à cette phase, comme indiqués dans le tableau 28 pour le pilier environnement. Dans le cas échéant, le projet ne répond pas à certains des critères d'évaluation ou s'il ne satisfait pas aux "Prérequis" du référentiel BuSAF, des recommandations d'amélioration seront proposées. Dans ce cas, l'équipe du projet soumet une demande de réévaluation finale de la phase de conception.

Pendant la phase construction, des visites de contrôle et d'évaluation seront effectuées pour évaluer les critères liés à la phase de construction, tels que « GD.1. Gestion des déchets de construction » et « P.2. Pollution des activités de construction ». Ces visites permettant également de vérifier si les stratégies et les engagements pris par l'équipe du projet lors de la phase de conception sont mis en

œuvre correctement. A la fin, la certification de la phase conception-construction sera délibérée en fonction des résultats de l'évaluation.

- Phase d'utilisation

Le bâtiment fait l'objet d'une deuxième évaluation de ses performances réelles un an après son occupation (un taux d'occupation de plus de 50 %) selon les sous-catégories dépendant de la phase d'occupation (Tableau 28), telles que les sous-catégories : « EE.4. Utilisation des énergies renouvelables », « E.1. Performance d'utilisation de l'eau à l'intérieur », « GD.2. Gestion des déchets ménagers ».

Après l'évaluation, le référentiel BuSAF sera en mesure de fournir un score final qui reflétera le niveau de durabilité du bâtiment. Ce modèle d'évaluation se compose de trois sous-modèles (BuSAF(Env), BuSAF(Eco) et BuSAF(Soc)) (Figure 57). Le score final de durabilité du bâtiment se calcule par l'équation suivante :

BUSAF = w_1×BuSAF(Env) + w_2 ×BuSAF (eco)+ w_3×BuSAF(s) Eq. 5

- BuSAF (i) est le score final de chaque pilier de durabilité,
- w_i : le poids de chaque pilier de durabilité.

Prenons l'exemple du score de la durabilité environnementale (BuSAF(Env)) que nous avons élaboré dans la présente thèse : BUSAF(Env) = $\sum_{k=1}^{7} w'_k \times Env_k$; avec :

- Env_k : Représente le score de chaque catégorie environnementale : $Env_k = \sum_{k=1}^{n} w''_k \times Env'_k$.
- w'_k et w''_k : Représente le poids de chaque catégorie et sous-catégorie selon les résultats de la méthode AHP (Tableau 44).
- Env'_k : le score normalisé de sous-catégorie d'évaluation, il est calculé à l'aide des notes des critères de chaque sous-catégorie par rapport aux points maximums.

3.3.2. Système de classification de la durabilité par BuSAF

Le système de classification du référentiel BuSAF a été établi en demandant aux participants à la pondération de saisir deux valeurs numériques (seuil minimum et maximum) comprises entre 0 et 100 dans le formulaire d'enquête du questionnaire (Annexe R) pour les cinq niveaux de performance (non classé, acceptable, bon, excellent et exceptionnel) du système BuSAF. Les cinq niveaux de performance ont été identifiés sur la base d'une approche similaire adoptée par d'autres systèmes GBRS tels que BREEAM, HQE, Mostadam et PRS. La valeur moyenne de ces seuils pour le niveau de performance a été calculée comme indiqué dans le tableau 45. A titre exemple, la limite inférieure du premier niveau : « Non classé » : $\frac{36+42+36+37+38+39+38+42+45+35+45+45+27+36+38}{15} = 38.60 \approx 40\ \%$.

Tableau 45: Cinq niveaux de certification BuSAF (Source : Auteur,2023)

Le niveau BuSAF	Les valeurs moyennes	Les valeurs retenues
Non classé	0- 38.60 %	[0-40 %[(☆☆☆☆)
Acceptable	41.02 -56.26%	[40-55 %[(★☆☆☆)
Bon	59.61–70.23%	[55-70 %[(★★☆☆)
Excellent	71.12- 91.76%	[70-90 %[(★★★☆)
Exceptionnel	93.06-100%	[90-100 %] (★★★★)

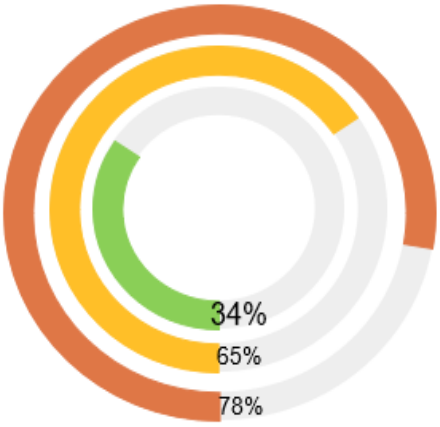


Figure 57:Exemple d'évaluation par le référentiel BuSAF (vert : BuSAF (env), Orange : BuSAF (eco) et Marron : BuSAF (soc)) (Source : Auteur,2023)

Ainsi, pour calculer le niveau de certification d'un bâtiment, le résultat de l'évaluation de l'équation (5) qui évalue la performance globale de la durabilité (BuSAF) du bâtiment. Le système de notation de la certification BuSAF est normalisé sur une échelle de 0 à 100, qui représente les cinq niveaux de performance. Par conséquent, sur la base des seuils des cinq niveaux de performance du système (Tableau 45), un projet du bâtiment pour être certifié doit avoir une valeur de 40 noté « Acceptable » avec une étoile. Le niveau de performance le plus élevé par ce système est le niveau de note « Exceptionnel », qui va de 90 à 100 % avec 5 étoiles. Ce dernier niveau vise à proposer des solutions de durabilité innovantes et à répondre à la majorité des critères d'évaluation selon les trois piliers de la durabilité.

3.4. Proposition pour la mise en déploiement du BuSAF

Comme nous l'avons démontré dans la première partie, la question de la durabilité dans le secteur du bâtiment est un sujet nouveau au Maroc. Alors, la mise en œuvre du référentiel BuSAF en tant qu'un référentiel qui contribue à l'amélioration de la durabilité dans le secteur du bâtiment résidentiel est cruciale au Maroc. Le BuSAF est proposé comme un départ pour un examen plus approfondi et une mise en œuvre dans les futures réglementations en matière du bâtiment durable. Après la démarche d'enregistrement du référentiel BuSAF par le SEMAC (Service marocain d'accréditation). L'implémentation du BuSAF se déroulera en quatre étapes principales, en se basant sur les résultats du chapitre 3 (moteurs et les obstacles de développement des GB) de la partie 1, comme le montre la figure 58. Dans un premier temps, il convient de sensibiliser les propriétaires et les immobiliers par la Fédération Nationale Des Promoteurs Immobiliers en présentant BuSAF à différentes organisations telles que les municipalités, les agences urbaines, annuaire des architectes, la fédération nationale de BTP et les différentes parties prenantes. Par conséquent, le référentiel BuSAF devrait être un programme basé sur le volontariat.

Dans un deuxième temps, après avoir sensibilisé les organisations et il faut inciter les praticiens du bâtiment à prendre en compte le BuSAF dans leurs projets de construction, telles que la réduction des taxes du permis de construction et pendant la phase l'immatriculation foncière et des factures à prix réduit peuvent être envisagées.

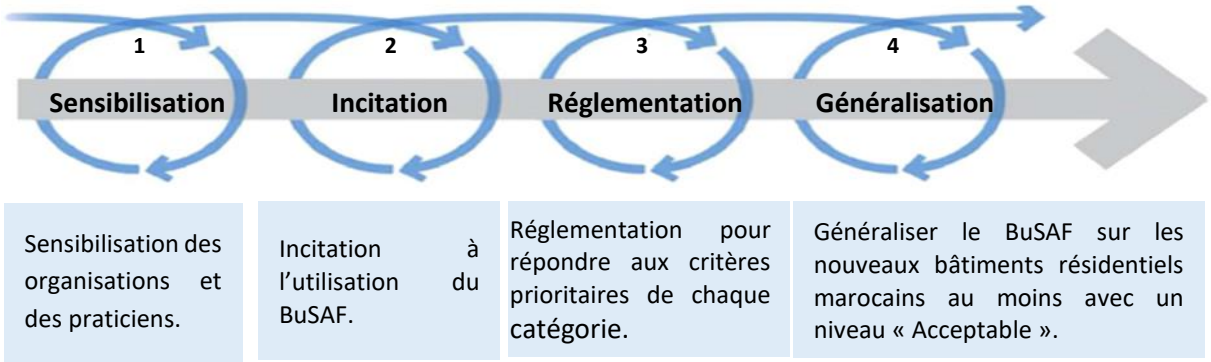


Figure 58: Stratégie de la mise en œuvre de BuSAF (Source : Auteur,2023)

Dans un troisième temps, des réglementations peuvent être envisagées au fil du temps en ce qui concerne l'utilisation du BuSAF. Par exemple, certaines catégories plus prioritaires (« Efficacité énergétique », « Eau » et « Site et Ecologie ») devraient être rendues obligatoires pour certains projets résidentiels par exemple un lotissement (plus de 100 habitants), haut standing et type villa. Afin que tous ces bâtiments résidentiels atteignent le degré de certification minimum acceptable (≥40). Un retour d'expérience sur les difficultés et les points à améliorer dans le système de BuSAF, servira à les corriger pour une nouvelle version. L'étape finale peut être celle de généraliser la démarche de certification sur les bâtiments résidentiels marocains.

3.5. Résumé

Le système de pondération élaboré par la technique AHP, par le biais de comparaisons par paires, a permis de classer les catégories et les sous-catégories de BuSAF(Env) par ordre de priorité. En tête de la liste des catégories, nous retrouvons « Efficacité énergétique », jugée primordiale par les 15 experts, avec un poids de 24 %. Cette mise en avant s'explique par l'accent actuellement porté sur l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment. En raison de la pénurie d'eau que le Maroc connait, la catégorie « Eau » (19.50 %) occupe la deuxième place dans le système de pondération de BuSAF(Env). Les autres catégories environnementales, à savoir « Site et écologie », « Matériaux de construction », « Gestion des risques », « Pollution » et la « Gestion des déchets solides » suivent par leur importance. Ces priorités reflètent le contexte local et les exigences essentielles des bâtiments résidentiels marocains. La particularité du référentiel BuSAF(Env), qui a élargi l'évaluation par la catégorie de « Gestion des risques », notamment les aléas climatiques présents ou futurs.. Le processus d'évaluation se déroule en trois étapes, de la phase de conception à une année d'occupation. La note finale de la durabilité du référentiel BuSAF(Env) est calculée par l'agrégation des points normalisés et pondérés des catégories et sous-catégories de durabilité. En outre, un pourcentage du score total pour les trois piliers de la durabilité, les niveaux de durabilité sont établis comme suit : « Exceptionnel », « Excellent », « Bon », « Acceptable » et « Non classé », sur une échelle de 0 à 100 %. Le seuil minimum requis pour qu'un bâtiment obtienne une certification durable selon le référentiel BuSAF est 40 %. Il est nécessaire de mettre à l'épreuve le référentiel BuSAF(Env) en l'appliquant à des études de cas.

CHAPITRE 4 : Application et test du référentiel BuSAF(Env)

4.1. Introduction

Afin de tester l'applicabilité et de valider la fiabilité du référentiel BuSAF(Env), ainsi que sa cohérence avec les principaux référentiels internationaux en vigueur, nous proposons d'adopter dans ce chapitre la méthode « étude de cas » visant d'une part à tester notre référentiel BuSAF(Env) sur deux études de cas (deux maisons marocaines modernes de référence), et d'autre part, à comparer les résultats obtenus pour les deux bâtiments de référence avec ceux obtenus en appliquant les trois principaux référentiels internationaux, en l'occurrence : HQE, BREAM et LEED. En effet, afin d'effectuer cette évaluation, notre choix a porté sur deux bâtiments résidentiels. L'un de ces bâtiments se situe à Rabat et l'autre dans la région de Tafrouat.

Dans un premier temps, nous procéderons à l'évaluation de ces deux études de cas pour déterminer leur niveau de performance environnementale conformément aux critères d'évaluation du référentiel BuSAF(Env). Par la suite, nous effectuerons une seconde évaluation sur la base des exigences des trois référentiels internationaux (HQE, BREEAM et LEED). Cette démarche vise à évaluer à quel niveau les résultats de la première évaluation sont cohérents avec les trois référentiels internationaux.

4.2. Sélection des études de cas

Nous avons sélectionné des études de cas de bâtiments résidentiels au Maroc en nous basant sur différents critères, notamment la représentativité des typologies de logements (3 à 5 pièces) et la disponibilité des données. Du plus, lors de la seconde évaluation, nous avions l'intention d'utiliser les résultats de bâtiments certifiés par les trois référentiels internationaux (HQE, BREEAM et LEED) pour une éventuelle comparaison avec le référentiel BuSAF(Env). Cependant, il s'est avéré que l'absence des bâtiments multi-certifiés par ces référentiels internationaux en même temps au Maroc. Par conséquent, nous avons envisagé au moins d'obtenir des données détaillées d'évaluation d'un de trois référentiels, puis de compléter les évaluations manquantes. D'après les listes des projets certifiés au Maroc, il a été constaté que les bâtiments résidentiels au Maroc étaient certifiés par le référentiel HQE. Par conséquent, nous avons contacté le responsable de certification de Certivéa, qui représente HQE au Maroc, pour obtenir un accès aux données d'évaluation détaillées des projets de « bâtiment résidentiel » certifiés par ce référentiel. Cependant, Certivéa a refusé de partager ces résultats, invoquant la confidentialité des données pour les bâtiments certifiés. En effet, nous avons contacté les chefs et les managers des bâtiments résidentiels certifiés pour obtenir des données, mais sans succès. Devant cette difficulté, nous avons été contraints d'opter pour le choix de deux bâtiments résidentiels de type « Maison Marocaine Moderne » non certifiés construits en 2012. Ces deux bâtiments ont participé à la compétition Green Building « Solutions », Awards, Maroc en 2015 [273]. Ils ont été sélectionnés en raison de leurs bonnes pratiques dans certains aspects de la durabilité, la disponibilité

des données et répondre aux exigences des critères « Prérequis » définis par le référentiel BuSAF(Env) proposé.

4.2.1. Description des bâtiments sélectionnés

Le premier bâtiment « DEFI » (Dispositif Expérimental pour l'évaluation des usages à Faible Impact) a été sélectionné à Tafraout dans une zone préurbaine, ainsi qu'un autre bâtiment à Rabat. Une description des deux projets est présentée ci-dessous :

- Etude de cas N°1 : Bâtiment « DEFI »



Figure 59: Paysage dégagé du bâtiment « DEFI »

Maitre d'ouvrage : Direction des Equipements Publics (Rabat)
Type de bâtiment : Maison marocaine moderne mono-famille isolée.
Surface totale : 750 m² et la surface nette : 110 m²
Année de construction : 2012
Surface totale : 750 m²
Surface bâtie : 110.50m²
Adresse : zone préurbaine, Tafraout
Zone climatique : Subtropical sec semi-aride
Zone thermique : Z6
TGBV : 10.12 %
Nombre d'occupants : 4

Le bâtiment DEFI, situé à Tafrouat-Agadir, présente un climat subtropical sec semi-aride. Il s'agit d'une maison avec un rez-de-chaussée, conçue de manière à préserver la vue dégagée (Figure 59). Le projet « DEFI » est un bâtiment prototype expérimental résultant d'un partenariat entre la France, le Maroc et l'Italie. Il implique l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (Lyon), la Direction des Equipements Publics (Rabat) et le Politecnico di Torino (Turin). Afin de développer des méthodologies et des outils (numériques et expérimentaux) pour la conception et la caractérisation des performances énergétiques des bâtiments.

- Etude de cas N°2 : Bâtiment « Autonome »

Le second bâtiment situé dans la ville de Rabat, a été construit après modification de l'architecture intérieur d'une maison marocaine traditionnelle existante et avec réutilisation de la structure. Après un entretien avec l'architecte, l'idée du projet est d'établir un bâtiment dit « Autonome » indépendant des réseaux de l'énergie, eau avec la production intégrée de 50 % de leurs besoins en légumes et avec zéro-déchets. Le bâtiment est conçu selon des règles précises : autonomie et respect des cycles naturels (cycle de l'eau, cycle de la matière organique et cycle de l'énergie). L'architecture utilisée se base sur la stratégie modulable s'adaptant selon les saisons et du nombre d'occupants (modification du cloisonnement).



Figure 60: Paysage dégagé du bâtiment « Autonome »

Maitre d'ouvrage : Myriam Soussan
Type de bâtiment : Maison marocaine moderne mono-famille
Année de rénovation : 2012
Adresse : Rue Sidi El Maati, ancienne Medina de Rabat
Zone climatique : un climat tempéré méditerranéen
Zone thermique : Z1
Surface nette : 207 m²
TGBV : 22.46 %
Nombre d'occupants : 2

4.2.2. Collecte de données

La collecte de données a été réalisée conformément aux recommandations de l'annexe B de la norme ISO 21931-1 : 2010 [274], qui définit les méthodes appropriées pour la collecte des données. L'évaluation des deux études de cas s'est principalement appuyée sur les informations fournies par les parties prenantes des projets et les plans de conception et le cas échéant, les informations fournies par les occupants. Les habitants ont été contactés à l'aide du maître d'ouvrage du bâtiment « DEFI » pour poser des questions sur les données, y compris sur d'éventuelles modifications et sur les données d'exploitation pendant l'année de référence 2022. De plus, nous avons régulièrement consulté le site Web de la plateforme construction 21_Maroc (https://www.construction21.org/maroc/case-studies/#page1:local) pour vérifier les mises les mises à jour et les informations connexes.

L'utilisation de plusieurs sources de données, notamment les plans des projets, les rapports techniques, les entretiens avec les maitres d'ouvrages de projet et les occupants, nous a permis de garantir la précision des données nécessaires pour évaluer ces deux bâtiments par le BuSAF(Env), comme indiqué en annexe (S).

4.3. Application de BuSAF (Env)

Les deux bâtiments ont fait l'objet d'une évaluation à l'aide des fiches descriptives de chaque critère d'évaluation du référentiel BuSAF(Env) de l'annexe (Q). Les notes des critères ont été normalisés et pondérés comme indiqué dans le tableau 47 avec les détails d'évaluation ont été présentés à l'annexe (T). Enfin, le niveau de performance de chaque catégorie est calculé par l'équation (5). Pour démontrer la démarche d'évaluation, nous allons démontrer l'exemple de la catégorie « Eau » pour la première étude de cas « Bâtiment DEFI ». La sous-catégorie « E.2. Performance d'utilisation de l'eau extérieure » est notée comme « Non applicable » (NA) en raison de l'absence d'un espace vert. De plus, les données nécessaires pour évaluer les critères de la phase de construction sont incomplètes, vu que les deux projets ont été construits en 2012. Donc, les critères suivants n'ont pas été évalués : « MC.5. Procédés de construction appropriés », « GD.1. Gestion des déchets de construction » et « P.2. Pollution des

activités de construction ». Cela nécessite une modification des poids de la pondération obtenue lors du chapitre 3, dans la colonne « Poids modifié » Tableau 46 avec un exemple de calcul.

Tableau 46: Exemple de calcul du score de la catégorie « Eau » du bâtiment « DEFI » par BuSAF(Env) (Source : Auteur,2023)

Eau	**Poids** **19.50**	**Poids modifié**	**Score maximum**	**Notation**	**Résultats normalisés et pondérés**
E.1. Performance d'utilisation de l'eau à l'intérieur	32.20 %	44.56 % *	5	3	26.74 %
E.2.Performance d'utilisation de l'eau extérieure	27.75 %	NA	5	NA	NA
E.3. Sources alternatives d'eau	24.48 %	33.88 %	5	-1	-6.78 %
E.4.Stratégie de gestion de l'eau	15.57 %	21.79 %	5	-1	-4.36 %
$* 32.20 + [(\frac{32.20}{100-27.75}) \times 27.75] = 44.56\%$			Total		15.60 %
			Total pondéré		**3.04 %**
Bonus d'innovation	-	-	5	0	-

Les étapes d'évaluation se déroulent de la manière suivante :

- Après avoir évalué le bâtiment « DEFI » à l'aide des fiches descriptives sur une échelle de -1 à 5, nous notons les scores dans la colonne « Notation ». Par exemple, la sous-catégorie « E.1. Performance d'utilisation de l'eau à l'intérieur » obtient un score de 3 points sur 5 points possibles ;
- Nous normalisons la note obtenue par rapport au score maximum possible pour chaque sous-catégorie. Dans notre exemple, cela donnerait : 3/5. Ensuite, nous multiplions ce résultat par le poids modifié de sous-catégorie, qui est de 44.56 %, pour obtenir le score normalisé et pondéré, soit 26.74 %.
- Nous répétons ces étapes pour toutes les sous-catégories. Nous additionnons ensuite ces scores pondérés, ce qui donne un total de 15.60 % ;
- Pour obtenir le total pondéré de la catégorie « Eau », nous multiplions ce résultat par le poids de cette catégorie, qui est de 19.50 %, qui donnera le score 3.04 % ;
- Enfin, nous calculons la somme des scores totaux pondérés pour les sept catégories de BuSAF(Env) et nous ajoutons 10 % des points de bonus d'innovation (Tableau 47).

Ces étapes de calcul nous permettent d'obtenir une évaluation complète et pondérée de la performance environnementale du bâtiment « DEFI » et du bâtiment « Autonome » en fonction des critères spécifiques de chaque catégorie (Tableau 47).

Tableau 47 : Résultats de l'évaluation par BuSAF(Env) pour les deux bâtiments (« DEFI » et « Autonome ») (Source : Auteur,2023)

				La notation		Résultats normalisés et pondérés	
Environnement	**Poids (%)**	Poids modifié	**Score maximum**	Bâtiment DEFI	Bâtiment autonome	Bâtiment DEFI	Bâtiment autonome
Site et écologie	**13.90**	**-**	**35**				
SE.1. Site du projet	33.48	-	10	0	10	0.00%	33.48%
SE.2. Ecologie du site	29.06	-	10	-2	6	-5.81%	17.44%
SE.3. Gestion des eaux pluviales	7.68	-	5	3	3	4.61%	4.61%
SE.4. Atténuation des îlots de chaleur	20.73	-	5	0	5	0.00%	20.73%
SE.5. Infrastructure adéquate	9.<05	-	5	3	5	5.43%	9.05%
				Total		4.23%	85.30%
				Total pondéré		**0.59%**	**11.86%**
Efficacité énergétique	**24.00**	Poids modifié	**20**	-	-	-	-
EE.1. Conception passive	33.87%	-	5	5	3	33.87%	20.32%
EE.2. Performance de l'enveloppe	Prérequis	-	Prérequis	Prérequis	Prérequis	Prérequis	Prérequis
EE.3. Efficacité des systèmes énergétiques	22.67%	-	5	3	5	13.60%	22.67%
EE.4. Utilisation des énergies renouvelables	28.63%	-	5	-1	5	-5.73%	28.63%
EE.5. Stratégie de gestion de l'énergie	14.83%	-	5	5	0	14.83%	0.00%
				Total		56.58%	71.62%
				Total pondéré		**13.58%**	**17.19%**
Bonus d'innovation	-	-	5	5	3	-	-
Eau	**19.50**	Poids modifié	**20**	-	-	-	-
E.1. Performance d'utilisation de l'eau à l'intérieur	32.20%	44.56 %	5	3	5	26.74%	32.20%
E.2.Performance d'utilisation de l'eau extérieure	27.75%	NA	5	NA	3	NA	16.65%
E.3. Sources alternatives d'eau	24.48%	33.88 %	5	-1	5	-6.78%	24.48%
E.4. Stratégie de gestion de l'eau	15.57%	21.79 %	5	-1	3	-4.36%	9.34%
				Total		15.60%	82.67%
				Total pondéré		**3.04%**	**16.12%**
Bonus d'innovation	-	-	5	0	3	-	-
Matériaux de construction	**13.30**	Poids modifié	**25**	-	-	-	-
MC.1. Impact environnemental des matériaux de construction	27.12%	31.80%	5	-1	0	-6.36%	0.00%
MC.2. Matériaux de construction avec contenu recyclé	21.34%	25%	5	0	0	0.00%	0.00%
MC.3. Matériaux de construction locaux	20.98%	24.60%	5	3	3	14.76%	14.76%
MC.4. Approvisionnement responsable des matériaux	15.86%	18.60%	5	0	0	0.00%	0.00%
MC.5. Procédés de construction appropriés	14.70%	NA	NA	NA	NA	NA	NA
				Total		8.40%	14.76%
				Total pondéré		**1.12%**	**1.96%**
Bonus d'innovation	-	-	5	0	0	-	-
Gestion des déchets solides	**8.20**	Poids modifié	**10**	-	-	-	-
GD.1. Gestion des déchets de construction	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA
GD.2. Gestion des déchets ménagers	42	53	5	-1	5	-10.55%	52.75%
GD.3. Valorisation des déchets organiques	37	47	5	0	5	0.00%	47.26%
				Total		-10.55%	100 %
				Total pondéré		**-0.87%**	**8.20%**
Bonus d'innovation	-	-	5	0	3	-	-

(Continue)							
Pollution	**10.40**	Poids modifié	**10**	-	-	-	-
P.1. Protection de la couche d'ozone	Prérequis	-	Prérequis	Prérequis	Prérequis	Prérequis	Prérequis
P.2. Pollution des activités de construction	28.93%	NA	NA	NA	NA	NA	NA
P.3. Contribution au changement climatique	39.25%	55.20%	5	-1	5	-11.44%	55.20%
P.4. Pollution des eaux	31.82%	44.80%	5	0	5	0.00%	44.80%
				Total		-11.04%	100.00%
				Total pondéré		**-1.15%**	**10.40%**
Gestion des risques	**10.70**	Poids modifié	**15**	-	-	-	-
GR.1. Risque des aléas climatique	46.01%	-	5	-1	0	-9.20%	0.00%
GE.2. Gestion du risque sismique	41.63%	-	5	0	0	0.00%	0.00%
GE.3. Risque microbiologique	12.36%	-	5	0	0	0.00%	0.00%
				Total		-9.20%	0.00%
				Total pondéré		**-0.98%**	**0.00%**
Bonus d'innovation	-	-	5	0	0	-	-
+ 10% de bonus d'innovation (…/25)						(5/25) **2%**	(9/25) **3.60%**
		Score final d'évaluation BuSAF (Env)				**17.33%**	**69.33%**
			Niveau de performance			**Non classé**	**Bon**

NA : Non Appliqué

La performance globale de deux études de cas est présentée dans le tableau 47 sous forme d'un score final pondéré. Le bâtiment « DEFI » a une performance de la durabilité environnementale de 17.33 %, tandis que le bâtiment « Autonome » a une meilleure performance avec 69.33 %. Sur la base de l'échelle de classement du référentiel BuSAF, le bâtiment « DEFI » a été classé comme « Non classé » (☆☆☆☆) et le bâtiment « Autonome » comme un bâtiment vert classé « Bon » (★★☆☆).

Un graphe radar (Figure 61) illustre la performance normalisée des sept catégories du BuSAF(Env) des deux bâtiments. L'analyse des scores des catégories de la durabilité des deux études de cas révèle que le « Bâtiment Autonome » surpasse le « Bâtiment DEFI » sur cinq catégories de durabilité environnementale suivantes : « Site et écologie », « Efficacité énergétique », « Eau », « Gestion des déchets solides » et « Pollution » avec des valeurs des scores de performance normalisées et pondérées de 85.30 %, 71.62 %, 82.67 %, 100 % et 100 % respectivement. Cependant, les deux bâtiments présentent un niveau de performance insuffisant dans les catégories « Gestion des risques » et « Matériaux de construction » (moins de 20 % des points possibles achevés).

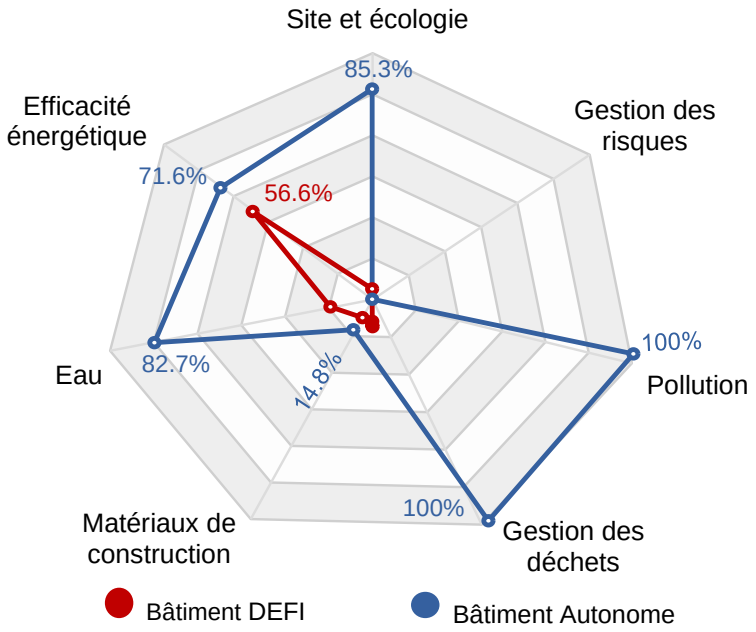


Figure 61: Comparaison des scores normalisés de la performance environnementale (BuSAF(Env)) des deux bâtiments (« DEFI » et « Autonome ») (Source : Auteur,2023)

La décomposition de l'analyse des catégories en sous-catégories et en critères d'évaluation permet de comprendre la différence de performance entre les deux bâtiments à chaque niveau des catégories. L'analyse des critères d'évaluation de deux bâtiments sélectionnés a révélé une grande disparité dans le niveau de la durabilité environnementale entre les deux études de cas.

Nous analysons les résultats selon les 7 catégories suivantes :

- La catégorie : Site et écologie

La catégorie « Site et écologie » comprend cinq sous-catégories, à savoir que « SE.1. Site de projet, « SE.2. Ecologie du site » et « SE.4. Atténuation des îlots de chaleur » ont les plus grande influence sur la note totale. Selon les résultats de l'évaluation, le bâtiment « Autonome » a été classé comme le meilleur dans cette catégorie, principalement en raison de son emplacement au centre de l'ancienne ville de Rabat (avec la proximité des principales commodités). Le deuxième bâtiment a été construit dans une zone préurbaine et que les principales commodités sont à plus de 1 Km. En revanche, le « Autonome » a été construit sur une parcelle d'une ancienne maison traditionnelle (limitant l'utilisation des terrains vierges), qu'il a été noté 5/5 pour le Critère 2 : Réutilisation des zones précédemment construites ou contaminées « Greyfield land ». Au niveau la réduction des ilots de chaleur, l'aménagement de la médina favorise l'ombrage de façade par les autres bâtiments voisins. La peinture blanche de toiture réduit les apports solaires en période estivale qui diminue l'effet des îlots de chaleur, cela a été noté le bâtiment « Autonome » avec 5/5. Au contraire, pour le bâtiment « DEFI » a été construit dans un milieu vierge à côté des palmiers, avec plus de 600 m² d'espace de jardin, non exploité. Cependant, le bâtiment « Autonome » a exploité la toiture et des espaces

intérieurs avec des espèces d'arbres et d'arbustes indigènes (Atriplex halimus, Agavaceae, Chamaerops humilis Thumb).

- La catégorie : Efficacité énergétique

Les concepteurs du bâtiment « DEFI » ont exploité les potentiels du site en forme de vallée, par la ventilation du couloir central du rez-de-chaussée et des surfaces d'ouverture réduites. Le bâtiment « Autonome » a exploité les murs extérieurs en pierre de matériaux à haute masse thermique, la stratégie de la ventilation naturelle avec un tirage thermique et d'un éclairage naturel par verrière double vitrage sur le toit. Il a donc noté 3/5, vu que les concepteurs n'ont pas eu d'autres possibilités sur le site reconstruit.

Les deux bâtiments ont des bonnes performances pour des systèmes énergétiques (pompe à chaleur et puits canadien) et pour les appareils électroménagers, sauf l'éclairage du bâtiment « DEFI » qui est surdimensionné. Le score obtenu de la sous-catégorie « EE.4. Utilisation des énergies renouvelables », – 1 pour le bâtiment « DEFI », indique une absence totale d'intégration des énergies renouvelables. Alors que le bâtiment « Autonome » a bien exploité la toiture en termes de l'énergie solaire (PV pour l'électricité et thermique pour l'eau chaude sanitaire), qu'il a été noté 5/5 et 3 points de bonus comme « Bâtiment à énergie zéro ».

Finalement, le bâtiment « DEFI » a été noté 5/5 pour la sous-catégorie « EE.5. Stratégie de gestion de l'énergie », par un système d'acquisition et pilotage de la consommation d'énergie par les différentes postes d'énergie ; au contraire du bâtiment « Autonome ».

- La catégorie : Eau

La catégorie de l'eau comprend la performance d'utilisation de l'eau à l'intérieur et les espaces extérieurs, « E.3. Sources alternatives d'eau » et « E.4. Stratégie de gestion de l'eau ». L'économie de l'utilisation de l'eau et les sources alternatives ont grande influence sur la notation globale de la catégorie l'eau. Malgré la situation actuelle de stress hydrique aux régions du sud, le projet « DEFI » à Tafrouat a été noté 1/15 sans stratégie d'économie de consommation de l'eau, cependant le bâtiment « Autonome » présente une excellente performance (82.67%), car il comprend des stratégies sur la réutilisation des eaux pluviales et des eaux grises après un multiple processus de traitement : biologique, ultrafiltration et désinfection par UV. La conservation de l'eau par des robinetteries avec réducteurs de débits, interrupteurs de débit, la consommation d'un lave-linge de classe A est d'environ 50 à 60L par lavage contre 100L pour les modèles plus obsolètes du bâtiment « DEFI » et une toilette à zéro eau dite toilette sèche pour le bâtiment « Autonome ».

- La catégorie : Matériaux de construction

Puisque cette évaluation est réalisée sur deux bâtiments existants construits en 2012, la sous-catégorie « MC.5. Procédés de construction appropriés » est non appliquée pendant cette évaluation.

Le bâtiment « DEFI » a été construit avec une structure poteaux-poutres (dalle pleine en béton armé, parpaings, polystyrène expansé et laine de roche), sans prise en considération de l'impact environnemental des matériaux de construction ou des stratégies de réduire l'empreinte carbone de la structure du bâtiment. Cela justifie le score -1/5 de la sous-catégorie « MC.1. Impact environnemental des matériaux de construction ». Au contraire, le bâtiment « Autonome » a exploité l'ancienne structure de la maison, qui a été construit en terre/pierre, les plafonds sont en béton armé et les planchers intermédiaires sont en bois et en liège de la forêt Maâmora, cela a noté le bâtiment « Autonome » avec 0/5. Pour cette sous-catégorie, l'absence des déclarations environnementales des matériaux de construction locaux rendre le choix des matériaux à faible impact environnemental difficile pour l'équipe du projet. Alors au niveau de la sous-catégorie « MC.3. Matériaux de construction locaux », les deux projets ont été notés avec 3/5, le bâtiment « DEFI » a été construit par un savoir-faire local (« AL ANSARY » et son fils), avec un produit de finition plâtre ciselé « Gebs » et le deuxième bâtiment a été construit en pierres et des matériaux locaux (bois du sapin rouge et du liège du Maâmora de Rabat).

- La catégorie : Gestion des déchets

Cette catégorie comprend trois sous-catégories à savoir « GD.1. Gestion des déchets de construction » non appliquée dans notre étude cas. La « GD.2. Gestion des déchets ménagers » et la « GD.3. Valorisation des déchets organiques » ont plus grande influence sur la notation. Le bâtiment « Autonome » a été classé comme le meilleur en tant qu'un bâtiment résidentiel zéro-déchets (100 %) par une réduction des déchets ménagers et l'engagement des habitants dans une politique anti-gâchis alimentaire et un système de tri des déchets destiné à la coopération de la valorisation des déchets du centre d'enfouissement Oum Azza à Rabat. Les déchets organiques ont été compostés afin d'être utilisés sur le site. Alors que, le bâtiment « DEFI » a été noté -1/10, car les déchets ont été envoyés directement vers une décharge sauvage de Tafrouat et aucune stratégie de tri ou de valorisation des déchets ménagers.

- La catégorie : Pollution

Cette catégorie a été évaluée à l'aide de quatre sous-catégories, y compris la « P.1. Protection de la couche d'ozone », « P.2. Pollution des activités de construction », « P.3. Contribution au changement climatique » et « P.4. Pollution des eaux ». Les deux projets ont accordé une importance pour les équipements utilisés dans le bâtiment sans CFC (Chlorofluorocarbure) comme les appareils de refroidissement.

L'évaluation de la contribution du bâtiment aux émissions des gaz à effet de serre, la valeur des émissions annuelles d'équivalent CO_2 ($kgCO_2eq/m^2.an$) du bâtiment « Autonome » est presque nulle avec une valeur 3.04 $KgCO_2$-eq/m²/an c'est-à-dire moins que la valeur référentielle de 20

$kgCO_2eq/m^2.an$. Le score obtenu 5/5, est dû aux stratégies dans la catégorie d'énergie, zéro m^3 d'eaux usées rejetées et valorisation des déchets. En revanche, le bâtiment « DEFI » -1 sur 10 points malgré la performance énergétique du chauffage et de refroidissement (puits canadien, pompe à chaleur, etc.).

- La catégorie : Gestion du risque

Il est important de prendre en compte des risques présents et futurs, comme le risque sismique et des aléas climatiques lors de la conception du bâtiment. Les exigences du règlement sismique V.2011 de la classe III sont respectées par les deux bâtiments, donc ont été notées 0/5 (suffisant). Le bâtiment « DEFI » a été construit sur la vallée de Tafrouat qui historiquement reconnaît des crues, comme l'année 2014, avec un risque élevé d'inondations et qui sera accentuée par les changements climatiques. Donc le bâtiment « DEFI » a été évalué -1/5 pour la sous-catégorie « GR.1. Risques des aléas climatiques ». Tandis que le bâtiment « Autonome » a été évalué 0/5, vu que le projet est situé loin de la zone du risque inondable en aval d'Oued Bouregreg et la submersion marine. Les deux bâtiments sont notés 0/5 vu qu'aucune stratégie de prévention du risque microbiologique n'a été appliquée.

En gros, les deux bâtiments ont des performances faibles pour cette catégorie, vu que les critères d'évaluation de gestion du risque sont en relation avec la phase de conception. Pareillement, ces risques sont souvent pris en considération pendant la phase de planification urbaine, mais des mesures d'adaptation appropriées à ces risques à l'échelle du bâtiment, peuvent contribuer à réduire les risques et à garantir une résilience du bâtiment. Des stratégies d'amélioration peuvent consister à mettre en place des mesures visant à empêcher la pénétration de l'eau dans le bâtiment (dans le cas d'inondations et de la submersion marine), par l'installation des dispositifs anti-eau (batardeaux devant les ouvertures, clapets anti-retours et matériaux résistants à l'eau dans le rez-de-chaussée) et de surélever les tableaux électriques et les installations électriques dans des zones non susceptibles d'être inondées.

Finalement, pour les points de bonus de l'innovation, le bâtiment « Autonome » a obtenu un total 9/25 des points de bonus ; 6 points pour leur zéro énergie et l'utilisation d'une toilette sèche à compostage et 3 points pour l'utilisation des murs en bois mobile et des chambres escamotables faciles à démonter qui réduit les déchets de la phase de démolition. Pour le bâtiment « DEFI » on a 5/25 pour l'utilisation d'un double vitrage avec un remplissage d'Argon et un échangeur air-matériaux à changement de phase.

On peut conclure que, le second bâtiment « Bâtiment Autonome » obtient de meilleure performance en termes de durabilité environnementale par rapport au « Bâtiment DEFI », qu'il a concentré sur la performance énergétique du puits canadien et l'échangeur Air-Matériaux à Changement de Phase.

Cela vient du fait que le processus de la conception de ce projet a été réalisé avec une compréhension et une prise en compte minimales pour les six catégories du BuSAF(Env). Ces résultats misent en lumière l'impact de l'aménagement du territoire de la ville Rabat et d'une zone préurbaine Tafourat sur les notes d'évaluation des bâtiments durables. Cet impact s'avère sur tous les critères évalués dans l'échelle « méso ». L'échelle « méso » se situe entre l'échelle micro (celle du bâtiment) et l'échelle macro (celle des villes, des régions ou des pays entiers). Cette échelle est cruciale pour comprendre comment les caractéristiques et les pratiques durables d'aménagement du territoire influencent sur les performances des bâtiments. Par exemple, l'emplacement d'un bâtiment dans la ville, son accès aux transports publics, l'écomobilité urbaine, la gestion des déchets solides et liquides et d'autres aspects. Cela a influencé considérablement la performance environnementale du bâtiment « DEFI » à Tafrouat.

Pour compléter la phase du test, nous procédons à une seconde évaluation par les critères de trois référentiels internationaux.

4.4. Muti-évaluation des deux bâtiments « DEFI » et « Autonome »

Pour la seconde évaluation, nous comparons les scores attribués par le référentiel BuSAF(Env) avec ceux attribués par les trois référentiels : HQE, BREEAM et LEED (type : bâtiment résidentiel). Pour ce faire, nous allons procéder à des évaluations sur les deux bâtiments précités, à savoir le bâtiment « DEFI » et le bâtiment « Autonome ».

Nous utiliserons la checklist Excel du référentiel HQE_résidentiel_V2015, le manuel technique de LEED v4.2018 « Home Design and Construction et OM (Operations and Maintenance) » et BREEAM : New Construction V.6.2021 [275]. La multi-évaluation implique de comparer les critères d'évaluation, les indicateurs, les méthodes de calcul et les niveaux de performance environnementale. De plus elle vise à étudier le niveau de cohérence entre le référentiel BuSAF(Env) proposé et les trois référentiels internationaux pendant l'évaluation des bâtiments résidentiels. Cette approche permettra d'identifier les points de divergence du référentiel BuSAF(Env) avec les autres référentiels étudies afin d'engager une réflexion sur d'éventuelles révisions. Nous ne tiendrons pas compte certains critères liés à la phase de construction, étant donné que les deux bâtiments ont été construits en 2012.

Avant d'effectuer la multi-évaluation, nous avons commencé par une réorganisation des critères d'évaluation des trois référentiels internationaux en fonction des critères d'évaluation proposés par BuSAF(Env) (Annexe U). A titre exemple : nous avons ajouté des critères « Tra.01 Public transport accessibility », « Tra.02 Proximity to amenities » et Tra.03b. Alternative modes of transport » de la catégorie « Transport » du référentiel BREEAM à la catégorie « Land use and ecology », qui correspond à la catégorie « Site et Ecologie » du BuSAF(Env). Nous avons également négligé certains critères d'évaluation présents dans les trois référentiels internationaux, mais ne sont pas considérés par le

référentiel BuSAF(Env), comme le critère « Ws.04 Speculative finishes » de BREEAM et les critères liés au confort et à la santé (« Indoor environmental quality ») que nous avons considéré dans le pilier social du référentiel BuSAF. Cela montre le problème de standardiser les catégories et les critères d'évaluation entre les GBRS, comme nous l'avons évoqué en axe 1.4.3 du chapitre 1 de la Partie 2. Nous avons apporté des modifications aux trois référentiels internationaux comme suit :

- Pour HQE_résidentiel_V2015 : La note finale du référentiel HQE se calcule selon le nombre des étoiles de quatre thèmes (« Environnement », « Energie », « Santé » et « Confort »), pour cette étude, on se base sur les deux thèmes : « Energie » et « Environnement » (cible 1. Site, 2. Composants, 4. Energie, 5. Eau et la cible 6. Déchets).
- Pour BREEAM New Construction V.6.2021 : il se base sur les 11 catégories. Dans cette étude, les deux catégories : « Management » et « Health and wellbeing » n'ont été pas considérés et la catégorie « Transport » a été intégrée dans la catégorie « Land use and ecology », donc les coefficients de pondération de chaque catégorie seront modifiés comme suit : « Land use » 19.50 %, « Energy » : 27.80 %, « Water » : 10.80 %, « Materials » : 18.90 %, « Waste » : 10 % et la « Pollution » : 13 % plus 10 % de l'innovation.
- Pour LEED v4.2018 : Les deux études de cas ont été évaluées sur 75 crédits disponibles pour le projet « DEFI » et 67 crédits pour bâtiment « Autonome » au lieu de 110 crédits.

Après l'évaluation des deux études de cas, les résultats du Tableau 48 (Détail d'évaluation dans l'annexe U) ont montré que le bâtiment « Autonome » à Rabat a obtenu des performances élevées dans toutes les évaluations. Il a été classé, comme « Très bon » selon le référentiel HQE, « GOLD » selon LEED et « Excellent » selon BREEAM. Le référentiel BuSAF(Env) a classé ce bâtiment dans la classe « Bon », qui est légèrement inférieure à celle de trois référentiels internationaux.

Tableau 48: Performance environnementale du bâtiment « DEFI » et « Autonome » de la multi-évaluation (Source : Auteur,2023)

Environnement	Bâtiment « DEFI »				Bâtiment « Autonome »			
	BuSAF (Env)	**HQE_ V2015**	**LEED V4 BD + O&M 2018**	**BREEAM V6.2021**	**BuSAF (Env)**	**HQE_ V.2015**	**LEED V4 BD + O&M 2018**	**BREEAM V6.2021**
Site et écologie	4.23%	0.00%	11.76%	8.33%	85.30%	50.00%	85.29%	61.11%
Efficacité énergétique	56.58%	71.43%	70.00%	78.95%	71.62%	71.43%	70.83%	73.68%
Eau	15.60%	6.25%	0.00%	12.50%	82.67%	81.25%	81.81%	87.50%
Matériaux de construction	8.40%	0.00%	0.00%	0.00%	14.76%	0.00%	16.61%	0.00%
Gestion des déchets solides	-10.55%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	77.78%	100.00%	100.00%
Pollution	-11.40%	NA	NA	57.00%	100.00%	NA	NA	85.71%
Gestion des risques	-9.20%	NA	NA	NA	0.00%	NA	NA	NA
Innovation	20.00%	NA	20.00%	12.50%	36.00%	NA	40.00%	37.5%
Score final	17.33% <40 **Non classé**	**NON CERTIFIE**	32 % < 40% **NON CLASSE**	33.78 % ∈ [30-45[**PASS**	69.33 % ∈ [55-70[**Bon**	☆☆☆☆ **TRES BON**	70.21%∈ [60-80[**GOLD**	72.46 % ∈ [70-85[**Excellent**

NA : Non appliqué

Alors que le bâtiment « DEFI » n'a pas réussi à atteindre un niveau de certification selon les trois référentiels : BuSAF(Env), HQE et LEED. Cependant, il a réussi à obtenir le niveau « PASS » selon le système BREEAM avec un score de 33.78 %, ce qui indique qu'elle a satisfait aux exigences minimales de 30 % du score pour ce référentiel.

Cette différence s'explique principalement par l'effet de l'échelle de notation que nous avons choisie, de -1 à 5. La note négative (-1) diminue le score final des catégories d'évaluation. Une deuxième cause de cette différence liée aux limites inférieure et supérieure des classes de certification, qui varient d'un référentiel à l'autre. Troisièmement, il convient de noter l'influence du nombre de classes dans les différents GBRS. Le référentiel LEED classe les bâtiments en quatre classes, tandis que le référentiel BuSAF comporte cinq classes.

Dans une seconde étape, nous nous intéressons à comparer les résultats des catégories du référentiel proposé BuSAF et ceux des référentiels internationaux, comme illustrés dans les deux graphes radars a) et b) de la figure 62.

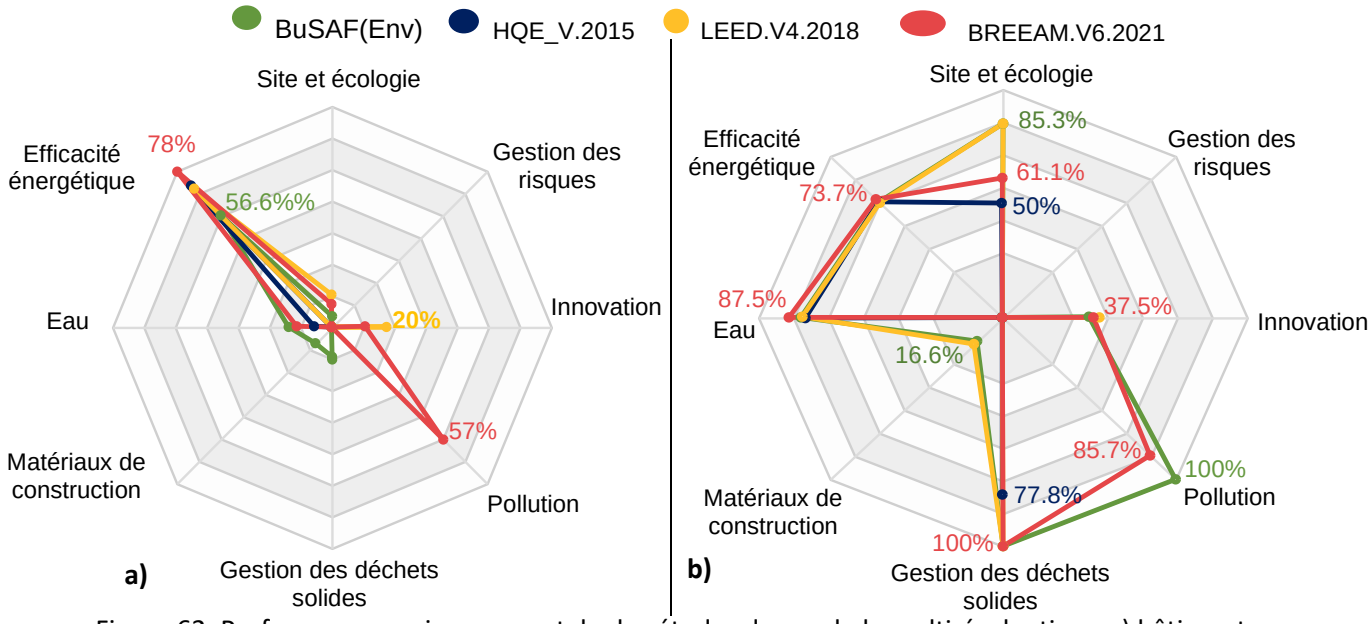


Figure 62: Performance environnementale des études de cas de la multi-évaluation : a) bâtiment « DEFI » et b) bâtiment « Autonome » (Source : Auteur,2023)

Le graphe radar du bâtiment « DEFI » (Figure 62, a)) met en évidence une cohérence dans l'évaluation des 6 catégories (« Site et écologie », « Efficacité énergétique », « Eau », « Matériaux de construction » et « Gestion des déchets solides ») du BuSAF(Env), ainsi que du niveau d'intégration de l'innovation par les quatre référentiels, à l'exception de la catégorie « Pollution », on constate une différence au niveau de la performance finale. De même, le second bâtiment « Autonome » (Figure 62, b)) présente globalement une cohérence entre l'évaluation par le référentiel BuSAF(Env) et les trois référentiels internationaux. Par exemple, la catégorie « Site et écologie » démontre une performance de 85.30 %

par le référentiel BuSAF(Env) et LEED, mais des divergences se remarquent entre les deux autres systèmes de certification HQE (50 %) et BREEAM (61.11%).

L'analyse de ces résultats pour chaque catégorie permet d'identifier à la fois les points de convergence, c'est-à-dire d'une part, les critères pour lesquels les résultats des évaluations étaient similaires ou cohérentes et d'autre part, les critères spécifiques de chaque référentiel (Tableau 48).

- Performance de la catégorie « Site et écologie »

Le bâtiment « DEFI » a obtenu un nombre faible de crédits dans la catégorie « Site et écologie » selon les quatre systèmes d'évaluation. Le fait que le projet ait atteint un niveau « Prérequis » selon la cible.1 « Site » du système HQE indique qu'il a seulement satisfait aux exigences minimales de ce référentiel. Selon les exigences du référentiel LEED, le bâtiment « DEFI » a obtenu une performance de 11.76 % (2/17 crédits possibles) de la catégorie « Sustainable sites » spécifiquement par le critère « Rainwater Management » : 2/3. Pour BREEAM, l'évaluation de même bâtiment lui a attribué une performance de 8.33 % (1.5 sur 18 crédits) de la catégorie « Land use and ecology », par l'indice d'accessibilité du critère « Tra 01. Public transport accessibility » (1/4) et 0.5 crédit par « Tra 02. Proximity to amenities ».

Pendant l'évaluation par le référentiel BuSAF(Env), nous avons obtenu un score légèrement inférieur (4.23 %) aux autres évaluations. Cela, s'expliquait par la notation négative de la sous-catégorie «SE.2. Ecologie du site » que le bâtiment « DEFI » a été notée : -2/10, en raison qu'il a été construit proche du palmier et un indice de végétalisation zéro. Ainsi que le critère 3 : Proximité des commodités de la sous-catégorie « Site du projet » a été notée : 0/5 sur un rayon de 600 m. En comparaison avec les autres référentiels, le périmètre de 600 mètres semble trop restreint dans une zone préurbaine comme le cas du bâtiment « DEFI ». Il serait donc pertinent de revoir notamment cette distance et de l'adapter en fonction de l'emplacement spécifique du bâtiment.

Pour le cas du bâtiment « Autonome », on observe que les scores sont élevés par les trois référentiels internationaux, ce qui confirme les résultats obtenus (85.30 %) par le référentiel BuSAF(Env). Lors de l'évaluation par le référentiel LEED, la catégorie « Sustainable sites » a obtenu un pourcentage de performance 85.29 % (14.5/17 crédits). Le référentiel BREEAM a attribué un score de 11/18 crédits (61.11 %) et par le référentiel HQE, il a été noté : trois exigences prérequises et 1 point sur 2 points possible (50 %), ce qui inférieur au score des deux référentiels (BuSAF(Env) et LEED). Cette différence s'explique par l'absence d'un parking à vélo et un espace de recharge pour véhicules électriques de l'exigence « Tra 03b. Alternative modes of transport » et l'exigence du critère « 1.3. Ecomobilité » de HQE, qui n'est pas encore généralisée au Maroc. De plus, le référentiel BREEAM a des exigences particulières concernant les critères « LE 4. Enhancing site ecology » et « LE 5. Long term impact on biodiversity » de la catégorie « Land use and ecology ». Elle requiert une étude réalisée par un expert

en écologie accrédité, communément appelé « Suitably Qualified Ecologist » afin d'évaluer l'impact écologique du site, ce qui loin d'être applicable au Maroc.

Les différences des scores entre les deux cas s'expliquent par la localisation du bâtiment « Autonome » au centre de l'ancienne ville de Rabat, par rapport au bâtiment « DEFI », qui est situé dans une zone préurbaine. Les deux bâtiments peuvent améliorer leur notation en ce qui concerne l'écomobilité et « Community resources » en encourageant la marche et le vélo au quotidien, ce qui permet de réduire les kilomètres parcourus en véhicules (VMT) et en automobiles. Il serait envisageable d'ajouter un espace de stockage pour les vélos. Bien que cela puisse être freiné par l'absence d'infrastructure urbaine telle que les voies cyclables.

Pour le bâtiment « DEFI », des propositions peuvent être envisagées pour améliorer la note « SE.4. Atténuation des îlots de chaleur » : l'implantation d'un toit vert et l'utilisation de matériaux de couleur claire à albédo élevé. De plus, il serait possible de planter des arbres ou d'autres plantes le long des murs externes pour fournir de l'ombre. Ces mesures pourraient améliorer la notation du bâtiment « DEFI », en répondant aux exigences relatives à la sous-catégorie « SE.2. Ecologie du site ».

- Performance de la catégorie « Efficacité énergétique »

Le référentiel BuSAF(Env) a attribué une performance 56.58 % pour la catégorie « Efficacité énergétique » pour le bâtiment « DEFI »; tandis que le référentiel HQE a attribué un niveau « Performant » pour la cible 4.Energie, avec 4 prérequis (PR) et 5 points sur sept possibles (71.43 %). Les deux autres systèmes internationaux ont attribué un score de 21/30 (70 %) et 15/19 crédits (78.95 %) au même bâtiment. Ces scores élevés suggèrent que le bâtiment « DEFI » a réussi à obtenir un nombre significatif de crédits pour ses performances en matière d'efficacité énergétique selon les exigences de chaque référentiel. Cela, incohérent avec la performance obtenue par le référentiel proposé BuSAF(Env) : 56.58 %. A cause de la notation -1 de la sous-catégorie « EE.4. Utilisation des énergies renouvelables ». Aussi, par le fait que la sous-catégorie «EE.2. Performance de l'enveloppe », est considérée comme un prérequis dans le BuSAF(Env) alors que dans les autres référentiels, il a contribué dans la notation de cette catégorie dans les trois référentiels internationaux.

Le bâtiment « Autonome » a obtenu une performance de l'ordre de 71.62 % dans le référentiel BuSAF(Env) pour la catégorie « Efficacité énergétique » et le système LEED a attribué un score de 17/24 crédits (70.83 %) pour la catégorie « Energy & Atmosphere ». Les deux autres référentiels HQE et BREEAM qui ont accordé des niveaux de performance respectivement de 71.43 % et 73.68 %. Ce qui reflète une grande cohérence entre les différentes évaluations du bâtiment « Autonome ».

En conclusion, les résultats de la multi-évaluation de la catégorie « Energie » se révèlent incohérentes entre le référentiel BuSAF(Env) et les trois référentiels pour le cas du bâtiment « DEFI », cela a montré l'impact de la note -1 de la sous-catégorie « EE.4. Utilisation des énergies renouvelables » de l'échelle d'évaluation (-1 à 5) que nous avons proposée. Pour ce bâtiment des améliorations peuvent être

apportées au système d'éclairage, ainsi que l'implantation de panneaux solaires pour l'eau chaude sanitaire et la production d'énergie renouvelable, en tenant compte de l'influence par l'ombrage des montagnes à côté du bâtiment.

En revanche, le bâtiment « Autonome » peut améliorer la notation de cette catégorie par l'installation d'un système de Monitoring énergétique.

- Performance de la catégorie « Eau »

Le référentiel BuSAF(Env) a attribué une performance de 15.60 % pour la catégorie « Eau » du bâtiment « DEFI ». Il a été ainsi noté 1/8 (12.50 %) par l'installation de trois vannes d'isolements des fuites, pour être en conformité au critère « Wat 03 Water leak detection and prevention » du référentiel BREEAM. Alors que les exigences de la cible 5. « Eau » du référentiel HQE « Non atteint » a été attribué pour deux critères prérequis parmi les quatre. Le système LEED a attribué un score de 0/8 crédit pour la catégorie « Water Efficiency ». Cela, s'explique par la différence de la méthode de calcul de l'exigence « Réduction de la consommation de l'eau à l'intérieur » par rapport aux autres référentiels. Selon le référentiel proposé BuSAF(Env), nous avons basé le calcul sur la dotation de l'eau potable de l'ONEE : 80 L/hab/jr. Cependant, les autres référentiels se basent sur un profil de consommation, qui n'est pas adapté au contexte du Maroc et plus exigeant.

Pour le second bâtiment, le référentiel BuSAF(Env) a attribué un niveau de performance de 82.67 % pour la catégorie « Eau ». Ce score suggère que le projet a mis en œuvre des pratiques exceptionnelles en matière de gestion de l'eau. Cela a été confirmé par l'évaluation HQE, qui a attribué un niveau « Très Performant » au projet pour la Cible 5. Eau, avec quatre exigences « Prérequis » et 13 sur 16 points possibles. Le système LEED et BREEAM ont attribué un score de 9/11 (81.81 %) et 7 sur huit crédits pour la catégorie « Water Efficiency ». Par conséquent, les résultats de la multi-évaluation dans cette catégorie paraissent en parfaite cohérence.

Afin que le bâtiment « Autonome » puisse atteindre un niveau exceptionnel, il serait opportun de prévoir un dispositif de lecture des consommations d'eau (froide et chaude). D'autre part, afin d'améliorer la notation du bâtiment « DEFI », il serait judicieux de :

- Améliorer la performance de l'utilisation de l'eau à l'intérieur du bâtiment en utilisant des robinets et des mousseurs hydro-économes ;
- Prévoir le captage des eaux pluviales sur le toit ;
- Changer le système de traitement des eaux usées de la fosse septique traditionnelle par un système de traitement extensif individuel avec la réutilisation des eaux traitées, surtout que la surface disponible du site (600 m²) est suffisante.

- Performance de la catégorie « Matériaux de construction »

Les deux référentiels LEED et BREEAM, ainsi que le BuSAF(Env) a attribué un score faible de performance conformément aux critères d'évaluation de la catégorie « Matériaux de construction ». Le système HQE a attribué un niveau « non atteint » aux deux bâtiments par la Cible 2. Composants, car ils n'ont pas satisfait aux trois prérequis de cette cible et n'ont obtenu aucun des sept points possibles. Cela suggère que lors de la conception et de la construction en 2012, les deux bâtiments n'ont pas suffisamment pris en compte le choix des matériaux de construction durables et procédés de construction appropriés. À cette époque et même aujourd'hui, peu d'industries de matériaux de construction ont établi des déclarations environnementales, rendant ainsi le choix des matériaux ayant moins d'impact sur l'environnement difficile. De plus, le manque des matériaux de construction biosourcés ou avec contenu recyclé locaux rend difficile à répondre aux exigences relatives à la sous-catégorie « MC.1. Impact environnemental des matériaux de construction ». Au niveau national, certaines recherches ont montré de bons résultats sur les matériaux recyclés au Maroc, tels que le remplacement des granulats naturels par des granulats de silex, issus de stériles phosphatés de l'OCP dans la production de béton [276]. Ainsi que l'utilisation des fibres Alpha et les fibres provenant de déchets de palmier dans le béton pour améliorer le confort hydrothermie [277]–[279], mais cela nécessite une industrialisation. Cependant, ces deux projets ont obtenu des points grâce à l'utilisation de matériaux de construction locaux, notamment le liège du Maamoura et le plâtre artisanal du Maroc (« Gebs ») selon la sous-catégorie « MC.3. Matériaux de construction locaux ». Le bâtiment « Autonome » atteint un niveau de 16.61 % du LEED grâce à la réutilisation la structure de l'ancienne maison.

- Performance de la catégorie « Gestion des déchets solides »

Le référentiel proposé BuSAF(Env) a attribué une performance de –10.55 % pour la catégorie « Gestion des déchets solides » du bâtiment « DEFI ». Il a un impact environnemental négatif pendant leur occupation, en raison de la gestion illégale des déchets ménagers dans une décharge sauvage et sans valorisation des déchets valorisables. Le référentiel HQE a indiqué que le projet n'a pas atteint le niveau « Prérequis » selon la cible 6. Déchets, en raison de deux exigences prérequises non atteintes. Pareil, BREEAM et LEED ont attribué un niveau de performance nul pour cette catégorie. Cela suggère que des améliorations sont nécessaires dans la gestion des déchets du bâtiment « DEFI ». Comme, le tri de déchets ménagers et valorisés la partie organique in situ, alors que les autres déchets peuvent être collectés par les chiffonniers locaux, vu l'absence des filières de valorisation des déchets plastiques et de carton dans la commune de Tafrouat.

Pour le bâtiment « Autonome » les occupants ont engagé une démarche volontaire de valorisation et de réduction de la production des déchets ménagers. Le système BuSAF(Env) a attribué ainsi une performance idéale de 100 % pour la catégorie « GD. Gestion des déchets solides ». Le système HQE a

attribué un niveau « Performant » au projet avec 5PR et 7/9 points disponibles (77.78 %). Bien que le score soit légèrement inférieur à celui des trois référentiels (BREEAM (100%), BuSAF-Env (100%) et LEED (100%). Cette différence du score est due au critère 6.3. La condition de stockage (3 points sur 4) et 6.4. Evacuation des déchets hors de l'emprise de l'opération (1 point sur 2). Ces deux critères évaluent la disposition d'un espace ou un local de débarras et limiter la pénibilité de manutention manuelle des conteneurs du point de stockage (bâtiment) vers le point de collecte externe.

- Performance de la catégorie « Pollution »

Cette catégorie a été prise en considération par les deux systèmes BuSAF(Env) et BREEAM. Le référentiel HQE a pris en considération uniquement la sous-catégorie « P.1. Pollution des activités de construction » par la cible 3. Chantier, mais cette dernière n'a pas été appliquée pour les deux études de cas. En revanche, la sous-catégorie « P.3. Contribution au changement climatique » ou « empreinte carbone » n'a pas été prise en compte par le référentiel HQE-Bâtiment résidentiel, version 2015. LEED a intégré l'évaluation des émissions des gaz à effet de serre de la consommation d'énergie d'une manière facultative dans l'évaluation de l'analyse cycle de vie du bâtiment, catégorie « Materials and Resources ». Il a également exigé l'utilisation de réfrigérants sans chlorofluorocarbone (CFC) dans la catégorie « Energy and Atmosphere », qui correspondant à la sous-catégorie « P.1. Protection de la couche d'ozone » du référentiel BuSAF(Env). Le bâtiment « DEFI » a été noté négativement de -10.74 % pour la catégorie « Pollution ». Tandis que le système BREEAM qui a attribué un score positif 57 % (4/7), indique des performances satisfaisantes. Ce score positif démontre la différence de la méthodologie d'évaluation entre ces deux référentiels. BREEAM a noté le bâtiment « DEFI » 2 sur 3 crédits possibles du critère « Pol 01. Surface water run-off » d'éviter des eaux pluviales stagnantes et la pollution des cours d'eau. Ce bâtiment a été évalué 1 sur 2 crédits du critère « Pol. 02 NOx emissions » par la réduction des émissions de NOx liées à la consommation d'énergie de chauffage, par l'utilisation d'un puits canadien et une pompe à chaleur. Alors dans la spécificité du système proposé BuSAF(Env), nous avons élargi l'exigence de la sous-catégorie « P.3. Contribution au changement climatique » avec des postes d'émission : énergie, production d'eau potable et l'assainissement solide. Cela confirme les conclusions précédentes sur la différence de score entre les systèmes d'évaluation pouvant être attribuables à des critères d'évaluation différents ou à des approches divergentes dans l'évaluation les performances. Pour avoir des améliorations selon les exigences du référentiel BuSAF(Env), il faut s'intéresser à la catégorie de l'eau, déchets et l'énergie, comme nous l'avons proposé précédemment. Cela montre le double effet de certains critères sur plusieurs catégories de performances environnementales.

Alors que le bâtiment « Autonome », avec leurs excellentes performances aux catégories « Efficacité énergétique », « Eau » et « Gestion des déchets », l'évaluation par le système BuSAF(Env) a attribué un score de 10/10 (100%) pour la catégorie « Pollution ». Cela suggère que le bâtiment ait mis en place

des pratiques efficaces de gestion de la pollution, minimisant ainsi son impact sur l'environnement. Le référentiel BREEAM a attribué un score de 6/7 crédits (85.71 %). Ce score indique que le bâtiment a réalisé certaines performances satisfaisantes en matière de gestion des pollutions selon les exigences BREEAM. Cependant, des améliorations possibles à apporter au niveau d'exigences en termes du système de détection des fuites de fluides frigorigènes du critère « Pol.01 Impact of refrigerants ».

- Innovation

Le référentiel BuSAF(Env), ainsi que les deux systèmes de certification BREEAM et LEED, présente des possibilités d'obtention de bonus liés à l'innovation. Le bâtiment « DEFI » a réussi à obtenir la notation de l'innovation par les performances de la catégorie d'efficacité énergétique. Il s'est démarqué notamment par un vitrage à isolation renforcée (VIR) et un échangeur Air-MCP : L'échangeur Air-Matériaux à Changement de Phase. Alors le bâtiment « Autonome » a atteint des performances exceptionnelles dans trois catégories (énergie, eau et déchets) de l'innovation du BuSAF, qui permit d'avoir 9 points sur 25 points possibles, ainsi que pour le référentiel LEED (2/5). En revanche, BREEAM a défini des critères spécifiques pour l'innovation, ce qui lui a permis d'attribuer 3 sur 7 points de bonus d'innovation selon trois critères suivants : Wat 01 Water consumption, Mat 03 Responsible sourcing of construction products et Ene 01 Reduction of energy use and carbon emissions.

D'après les comparaisons des résultats de la multi-évaluation, ci-dessous quelques points qui méritent des réflexion pour des éventuelles améliorations du référentiel BuSAF(Env), comme :

- L'effet des seuils ou des exigences dans les critères d'évaluation. A titre d'exemple, le nombre des commodités principales dans un périmètre de 600 mètres pour évaluer le critère 3 « Proximité des commodités ». Cette distance n'est pas adaptée à une zone préurbaine.
- L'impact de la note -1 de l'échelle échelonnée de -1 à 5 sur la note finale des sous-catégories et le score final. Au début de cette thèse, nous avons proposé la note négative : -1 pour pénaliser les performances insuffisances pour certains critères d'évaluation. Cela, incite l'équipe du projet à accorder une attention particulière à l'ensemble des critères d'évaluation. Alors, elle entraîne une réduction des scores de notation par rapport aux référentiels internationaux. Ces derniers évaluent les critères insuffisants par zéro.
- La méthode de calcul du score final diffère entre les référentiels. Les systèmes HQE et LEED agrègent directement les notes de chaque catégorie ou cible, tandis que le référentiel BuSAF(Env) et BREEAM agrègent les notes pondérées. Cela a un effet sur la compensation. A titre d'exemple, 1 point dans une catégorie « X » avec une pondération de 20 % équivaut à deux points pour une catégorie « Y », avec un coefficient de pondération de 10 %.

Globalement, les résultats d'évaluation obtenus par le système BuSAF(Env) convergent avec ceux des systèmes de certification reconnus à l'exception de la catégorie « Pollution » et des divergences des

scores observées au niveau de certains critères d'évaluation, mettant en évidence la spécificité de chaque GBRS. Alors que la catégorie « Gestion des risques » est une proposition du référentiel BuSAF (Env) qui renforce la résilience du bâtiment, un aspect qui n'est pas directement pris en considération par les autres GBRS.

4.5. Résumé

Le processus d'évaluation a été appliqué à deux études de cas, chacune se distinguant par sa localisation et son modèle de construction. Les performances globales des deux bâtiments ont été comparées, mettant en évidence une meilleure performance environnementale du bâtiment « Autonome » avec un score de 69.33 % (Bon) par rapport au bâtiment « DEFI » qui a obtenu 17.33 % (Non classé). Cette différence met en évidence le fait que le bâtiment « DEFI » met principalement l'accent sur certaines performances énergétiques, tandis que les autres aspects présentent des performances insuffisantes en raison de processus de conception non durables, d'une attention insuffisante aux questions de durabilité du site, d'une faible efficacité dans l'utilisation de l'eau, d'un manque de matériaux durables, de pratiques de recyclage des déchets inexistantes et d'une prise en compte insuffisante de la pollution environnementale. Aussi bien, l'impact de l'aménagement territoire de la zone préurbaine de Tafrouat sur les performances environnementales du bâtiment « DEFI ».

En outre ce chapitre nous permet d'aboutir à des conclusions concernant l'évaluation du référentiel BuSAF(Env) et sa cohérence avec les référentiels internationaux : HQE, LEED et BREEAM. Les divergences constatées dans les scores de certains critères d'évaluation mettent en évidence les variations entre les méthodes d'évaluation, les échelles de notation et les méthodes d'agrégation des points dans chaque GBRS.

Résumé de la partie

Le référentiel BuSAF (*Building Sustainability Assessment Framework*) a été hiérarchisé en trois niveaux, en commençant par les trois piliers de la durabilité (TBL), puis les catégories, sous-catégories et critères d'évaluation. Les experts en bâtiments verts ont priorisé 7 catégories environnementales, 3 catégories économiques et 3 catégories sociales par la méthode Delphi. Les catégories environnementales subdivisées en 29 sous-catégories et 49 critères d'évaluation. Chaque critère a été évalué à l'aide d'une échelle de notation de -1 à 5, avec des seuils définis en fonction des réglementations nationales et internationales. Cela, a abouti à 49 fiches descriptives détaillant chaque critère d'évaluation BuSAF(Env), incluant des informations sur la réglementation associée, la phase d'évaluation, la méthode de calcul et le coefficient de pondération basé sur la méthode AHP. Ce processus a permis l'élaboration d'un système de pondération qui reflète l'importance de chaque catégorie : « Efficacité énergétique » (24.00 %), « Eau » (19.50 %), « Site et écologie » (13.90 %), « Matériaux de construction » (13.30 %), « Gestion des risques » (10.70 %), « Pollution » (10.40 %) et « Gestion des déchets solides » (8.20 %). La prise en compte la catégorie « Gestion des risques » renforce la pertinence du référentiel proposé, qui contribue dans la résilience du bâtiment. Le processus d'évaluation du système BuSAF(Env) se déroule en trois étapes, de la conception à l'occupation, avec une échelle de certification de 0 à 100 %. Ce processus a été appliqué dans le cadre des deux études de cas, révélant une meilleure performance environnementale du bâtiment « Autonome » classé « Bon » par rapport au bâtiment « DEFI » qui a été non classé. Cette comparaison souligne en évidence que l'intégration des critères environnementaux tout en long du processus de conception peut conduire à des bâtiments plus durables. Bien que le développement des bâtiments durables ne puisse être pleinement réalisé que par une démarche intégrée qui prend en compte non seulement les caractéristiques et les pratiques durables d'un bâtiment en particulier, mais également l'environnement urbain pour obtenir des résultats optimaux.

Globalement, les résultats d'évaluation par BuSAF(Env) des deux maisons marocaines modernes sont cohérents avec ceux obtenus lors d'une évaluation multiple menée par HQE, LEED et BREEAM, en prenant en compte les spécificités locales, ce qui renforce la crédibilité du système proposé.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette conclusion présente un résumé des motivations de la recherche et synthétise les principaux résultats en réponse aux questions formulées au début de cette thèse. Elle souligne également, les contributions théoriques et pratiques de cette thèse dans le domaine « Bâtiment vert ». De plus, elle propose des recommandations pour le développement des bâtiments verts au Maroc tout en soulignant les principales limites avec des propositions pour la poursuite des futurs travaux de recherche.

1. Motivations

La transformation de l'architecture vernaculaire des bâtiments traditionnels en structures modernes en béton armé est évidente au Maroc. Ce changement radical dans les méthodes de construction exerce une pression sur les matériaux de construction, l'énergie, l'approvisionnement en eau et d'autres services. En raison de cette dépendance, le secteur du bâtiment au Maroc impacte fortement les réserves nationales en ressources naturelles. En effet, les deux tiers de l'énergie électrique produite au Maroc est consommée par le secteur du bâtiment. Cela démontre que le besoin de pratiques durables et de solutions novatrices est devenu impératif. Il devrait donc y avoir une plus grande préoccupation et une action collective orientées vers la conception et l'adoption de bâtiments durables à l'échelle nationale. L'importance de cette question a motivé cette thèse et ses objectifs de recherche visant à promouvoir le développement durable dans le secteur du bâtiment au Maroc.

2. Répondre aux objectifs de recherche

Le premier objectif de cette thèse est d'analyser la situation actuelle des bâtiments verts au Maroc et d'évaluer les obstacles ainsi que les moteurs pour le déploiement d'une stratégie verte dans le secteur du bâtiment. En second lieu, nous avons proposé l'élaboration d'un référentiel multicritère d'évaluation de la durabilité des bâtiments résidentiels, permettant de reconnaître et d'évaluer ces bâtiments en fonction de leurs caractéristiques environnementales, économiques et sociales. Cela devrait contribuer à la promotion des bâtiments durables au Maroc.

2.1 Production scientifique sur la thématique « Bâtiment vert »

Une analyse de 159 articles scientifiques portant sur la région d'Afrique du Nord et le Moyen-Orient sur la thématique des bâtiments verts, pendant la période 2000-2021 a été réalisée. Les résultats mettent en évidence une augmentation de la production scientifique, notamment dans les pays du Golfe, comme l'Arabie saoudite et l'Iran. Cependant, les institutions de ces pays ne montrent pas de liens de collaboration significatifs, mais plutôt des coopérations Sud-Nord intéressantes avec des pays comme le Royaume-Uni, Australie, Malaisie et les États-Unis. Parmi les neuf instituts de la région MENA, quelques liens de collaboration interrégionale ont été établis parmi les 58 organisations

analysées. Trois instituts tunisiens ont collaboré avec deux unités de recherche saoudiennes, à savoir l'université du Roi Abdelaziz et l'université Djeddah. Cette dernière a collaboré avec des instituts nationaux tels que l'université princesse Noura Abdul Rahman, ainsi que des collaborations régionales avec l'université irakienne de développement humain. Il est à noter que l'université du Roi Abdelaziz (KSA) coopère avec divers instituts appartenant à deux clusters (Figure 14) et des partenariats avec l'université égyptienne Helwān.

2.2 Etat des lieux des bâtiments verts au Maroc

Le Maroc a accompli des avancées dans l'encadrement du secteur du bâtiment par une série de textes juridiques tels que la règlementation thermique du bâtiment (RTCM), ainsi que l'élaboration et la révision d'environ 150 normes internationales par l'Institut Marocain de Normalisation IMANOR. Le pays s'engage dans la lutte contre le changement climatique dans le secteur du bâtiment par des projets de NAMA-Habitat, visant à réduire les émissions de CO_2 de 23537.80 Kteq d'ici à 2030. Bien que le concept des bâtiments verts au Maroc en soit encore à ses débuts. Cela a été affirmé par 44 % des participants au questionnaire (A), illustrant ainsi l'émergence de la notion des bâtiments verts dans l'industrie du bâtiment marocaine. De 2014 à 2022, pas moins de 74 projets ont été certifiés par les référentiels internationaux (HQE, LEED et BREEAM).

2.3 Obstacles et moteurs associés à l'intégration de la durabilité dans le secteur du bâtiment

L'examen de la littérature a constitué la base pour recueillir les 12 obstacles et 16 facteurs moteurs de la mise en œuvre des bâtiments verts. Au total, 167 répondants, issus d'une variété de professions et possédant une expérience directe dans le secteur du bâtiment, ont participé à l'enquête par questionnaire. Les quatre groupes des répondants ont convenu que l'obstacle le plus important à la mise en œuvre des bâtiments verts était le B6. « Absence de codes et de réglementations pour les GB », B5. « Manque d'intérêt par les clients et la demande du marché, ainsi que B7 « Complexité des projets ». En ce qui concerne les moteurs pour surmonter ces obstacles et favoriser la mise en œuvre des GB. Il y a eu un consensus parmi les différents groupes de répondants sur l'importance d'une réglementation complète en faveur bâtiment vert (M3), avec d'autres moteurs importants incluent M15. « Réduction des coûts du cycle de vie » et M16. « Développement de la recherche et de la formation » des parties prenantes.

2.4 Développement d'un référentiel d'évaluation de la durabilité (BuSAF)

L'hypothèse principale de la deuxième partie de la thèse est que les référentiels internationaux (HQE, BREEAM et LEED) n'étaient pas adaptés de manière adéquate aux spécificités et aux contextes environnementaux et sociaux du Maroc. Cette hypothèse a été explorée à travers un examen de la littérature ainsi que l'analyse des systèmes d'évaluation existants dans différents contextes, tant dans

des pays développés que ceux en voie de développement. En outre, la consultation d'experts via la technique Delphi a été utilisée pour obtenir un consensus sur les catégories d'évaluation. Après, deux tours successifs de consultations, les résultats ont abouti à l'identification de sept catégories prioritaires de durabilité environnementale (« Site et écologie », « Efficacité énergétique », « Eau », « Matériaux de construction », « Gestion des déchets solides », « Pollution » et « Gestion des risques »), trois catégories sociales (« Santé et bien-être », « Accessibilité » et « Sécurité et sûreté ») et 3 catégories économiques (« Coûts du cycle de vie », « Flexibilité » et « Abordabilité ») pour le référentiel proposé, *Building Sustainability Assessment Framework* (BuSAF).

Le focus de cette thèse s'est porté particulièrement sur la durabilité environnementale BuSAF(Env). Les sept catégories de durabilité environnementale ont été hiérarchisées en 29 sous-catégories et 49 critères d'évaluation. Les fiches descriptives des critères d'évaluation du système BuSAF(Env) sont présentées en annexe (Q). La phase de la pondération des catégories et sous-catégories du référentiel BuSAF(Env) basée sur la méthode AHP en impliquant un groupe de 15 experts. Ce processus a permis l'élaboration d'un système de pondération qui reflète l'importance de chaque catégorie : « Efficacité énergétique » (24.00 %), « Eau » (19.50 %), « Site et écologie » (13.90 %), « Matériaux de construction » (13.30 %), « Gestion des risques » (10.70 %), « Pollution » (10.40 %) et « Gestion des déchets solides » (8.20 %).

Les niveaux de certification du BuSAF ont été établis comme suit : « Non classé », « Acceptable », « Bon », « Excellent » et « Exceptionnel », sur une échelle de 0 à 100 %. Une analyse comparative a été menée entre le référentiel BuSAF(Env) et quatre outils de certification de bâtiments verts dans les pays développés (BREEAM, LEED, Green star et Green Mark), ainsi qu'avec quatre outils d'évaluation utilisés dans des contextes similaires au Maroc au sein de la région MENA (GSAS, GPRS, PRS et Mostadam). Cette comparaison a permis de tirer plusieurs conclusions, notamment que les systèmes de certification de la région MENA, y compris le BuSAF(Env), accordent une priorité plus élevée à certaines catégories telles que l'efficacité énergétique et la conservation de l'eau. La particularité du système BuSAF(Env) évalue la contribution bâtiment aux changements climatiques par les émissions des GES pendant la phase d'occupation et la production des eaux usées, alors que pendant la phase de conception les risques liés aux aléas climatiques et sismiques sont intégrés.

3. Contribution de la thèse

La présente recherche apporte plusieurs contributions aux connaissances et aux pratiques actuelles en matière de durabilité, comme suit :

Tout d'abord, cette recherche a permis d'approfondir la compréhension du concept du « Bâtiment durable » avec les autres couramment utilisés tels que « Bâtiment vert » (Green building) et « Bâtiment écologique ». L'étude scientométrique régionale (MENA) sur la thématique « Bâtiments

verts », complète les études menées à l'échelle internationale et dans d'autres régions, en mettant en évidence le rythme de publication, les thèmes de recherche développés dans la région MENA et les réseaux institutionnels de collaboration existants, qui aideront à établir de nouveaux liens de collaboration dans le domaine. Ensuite, cette thèse explore les pratiques existantes en identifiant les obstacles et moteurs qui influencent la mise en œuvre des bâtiments verts au Maroc. Le classement de ces facteurs constitue une base solide pour élaborer des processus décisionnels et des lignes directrices à l'intention des agences gouvernementales, des organismes et autres intervenants clés de l'industrie du bâtiment. En outre, le développement d'un référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments BuSAF est une contribution significative aux connaissances et à la pratique. Il s'agit de la première tentative de développement d'un système d'évaluation holistique des bâtiments durables dans le contexte du Maroc (BuSAF). Ce dernier faisant de la deuxième génération de GBRS qui se base sur le principe de la Triple Bottom Line. Cela, présente une amélioration par rapport aux référentiels existants. Ce référentiel permet le maintien et l'amélioration des performances de durabilité des bâtiments tout au long de leur cycle de vie. De plus, la mise en œuvre du BuSAF favorise le développement des bâtiments plus durables et guider les équipes de conception et de construction vers l'utilisation de technologies plus respectueuses de l'environnement. Il est essentiel que ce référentiel soit traduit en arabe pour en faciliter son accessibilité et sa compréhension par tous.

4. Recommandations de la recherche

Cette recherche propose un certain nombre d'orientations futures pour une poursuite de la recherche scientifique sur la thématique « Bâtiment vert » dans la région MENA et des recommandations qui pourraient améliorer les pratiques de construction durable dans le contexte du Maroc.

4.1. Proposition d'un cadre de collaboration scientifique

Les résultats de l'analyse scientométrique ont montré une faible collaboration académique entre les membres de la région MENA, pour remédier à cela, il est impératif de formaliser une vision collective en matière de recherche scientifique et d'innovation, prenant en compte les intérêts communs des pays de la région MENA. Cette démarche s'appuie sur le rôle crucial du conseil régional des bâtiments verts (MENA-GBC), selon deux niveaux :

- Au niveau de chaque pays de la région MENA, il est préconisé d'établir des conseils nationaux pour les bâtiments verts, tout en coordonnant leurs actions. Pour réaliser cela, nous pouvons prendre à titre d'exemple le Royaume-Uni (UKGBC), qui a utilisé l'outil Kumu pour créer une carte des acteurs et des organisations et des initiatives de développement des GB. Les chercheurs suivront ensuite les recommandations consensuelles provenant de ces conseils.
- A l'échelle du conseil régional (MENA-GBC) au sein du WorldGBC, intégration d'une session au rassemblement annuel du conseil serait important pour examiner les différents rapports issus

des conseils nationaux, et ainsi de définir des feuilles de route en fonction des thèmes de recherche communs dans la région, y compris les deux thèmes de recherche que nous avons mis en évidence dans l'analyse scientométrique. Ils seront approfondis grâce à la participation des unités de recherche de différents pays de MENA, en collaboration avec les collaborateurs internationaux tels que : UK, USA et Malaisie (cf. Figure 16). Evidemment, la question du financement revêt une importance cruciale. Les financements des projets de recherche en partenariat multilatéral et la facilitation de la mobilité des chercheurs doivent être ciblés en priorité.

4.2.Recommandations pour les principaux acteurs de la construction durable

Un projet de construction durable réussi repose sur une démarche intégrée impliquant tous les acteurs concernés. Un résumé des recommandations issues du classement des 16 moteurs inclut les éléments suivants :

- Pour le gouvernement et les autorités locales

- Réformer le Conseil marocain du bâtiment vert (MGBC) et établir un système national de certification des bâtiments durables (le référentiel BuSAF comme exemple) ;
- Mettre en place des incitations financières et non financières pour les projets des bâtiments durables ;
- Promouvoir des projets de construction durable sous l'égide du gouvernement, servant d'exemple pour sensibiliser davantage et pour des études de recherche.
- Développer un cadre réglementaire similaire au Code international de la construction durable, abordant des questions de durabilité ;
- Créer un système de récompense/reconnaissance pour les professionnels/organisations participent aux projets de bâtiments verts.

- Pour les professionnels et les établissements d'enseignement

- Encourager les fédérations professionnelles et les entreprises de construction à intensifier la formation de leurs membres à travers des ateliers et des séminaires ;
- Enrichir les programmes de formation universitaire avec des contenus relatifs à la construction durable ;
- Promouvoir la recherche et le transfert de connaissances par des colloques et des séminaires;
- Mettre en avant la faisabilité et les avantages économiques, sociaux et environnementaux des bâtiments durables ;

- Pour l'industrie des matériaux de construction

- Les importateurs des matériaux et des technologies devraient privilégier les matériaux locaux à faible impact environnemental et un coût abordable ;

- Etablir une autorité tierce indépendante qualifiée pour contrôler la performance environnementale des matériaux de construction locaux. Cette autorité serait chargée d'étiqueter les matériaux en fonction de leur impact environnemental et de vérifier les données environnementales telles que le contenu recyclé, la source du matériau, etc.

5. Limites et perspectives

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour améliorer l'analyse scientométrique dans la région MENA. Pendant la phase de collecte des données, nous nous sommes concentrés principalement sur les articles liés à la thématique « Bâtiment vert ». Nous suggérons d'élargir cette analyse en incluant d'autres thématiques en relation avec les bâtiments verts tels que l'efficacité énergétique.

De plus, nous proposons de compléter le référentiel BuSAF(Env) proposé en l'élargissant aux deux autres piliers de développement durable (« Economique » (BuSAF(Eco)) et « Social » (BuSAF(Soc)). La même démarche adoptée pour la partie BuSAF(Env) pourra être ainsi suivie pour la hiérarchisation des trois catégories économiques et des trois catégories sociales sélectionnées. Sur ce plan, une collaboration avec des équipes de recherche en socio-économie est recommandée. En ce qui concerne l'effet de la taille relativement restreinte de l'échantillon (15 répondants) lors de la pondération des items, ceci a été relativement atténué grâce à l'expérience du panel d'experts consulté. Des études futures pourraient envisager des enquêtes plus étendues.

Lors de la hiérarchisation et de la pondération des items du référentiel BuSAF, il est essentiel de prendre en compte le multi-effet entre les critères et les sous-catégories de durabilité. A tire exemple, le critère d'ilot de chaleurs à l'échelle du bâtiment a un impact direct sur la consommation d'énergie (ressources naturelles) et un impact indirect sur le confort des occupants. Ces interrelations peuvent être étudiées en utilisant des méthodes telles que la méthode du processus de réseau analytique (Analytic Network Process (ANP)) et la méthode intégrale de Choquet (Choquet fuzzy integral method). Pendant l'évaluation, nous avons utilisé une échelle de notation de -1 à 5 basée sur une fonction échelonnée, ce qui peut simplifier la comparaison des bâtiments en les classant dans des niveaux de performance de durabilité prédéfinis, en l'occurrence : « Non classé », « Acceptable », « Bon », « Excellent » et Exceptionnel. Malgré que cette approche a été critiquée par Chandratilake *et al.* (2015)[253], qui ont proposé d'utiliser des fonctions continues pour une évaluation plus progressive et plus précise de la durabilité des bâtiments, celle-ci est particulièrement utile lorsque des données détaillées sont disponibles, pour appliquer la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV).

Enfin, il convient de noter que ce travail qui a concerné spécifiquement les bâtiments résidentiels pourrait être complété et élargi aux bâtiments tertiaires, moyennant des adaptations. En outre,

davantage d'études de cas sont recommandées pour une meilleure rétroaction et une éventuelle amélioration du référentiel BuSAF(Env) proposé.

Finalement, à l'issue de ce travail, nous pouvons affirmer que la présente thèse a permis de répondre à nos questions de recherche initialement formulées et de poser les jalons pour l'élaboration d'un référentiel d'évaluation de la durabilité des bâtiments résidentiels adapté au contexte marocain. Elle a permis également d'identifier les principaux obstacles et moteurs au déploiement des bâtiments durables sur le plan national. En dernier, elle suggère des recommandations pour l'amélioration de la durabilité du secteur du bâtiment au Maroc ainsi que des perspectives pour les futurs travaux de recherche.

GLOSSAIRE

Dans ce manuscrit, nous utilisons des notions et des termes en relation avec la thématique de la recherche « Bâtiment durable », on trouve :

Analyse cycle de vie : Telle que définie par la norme ISO 14040, est une approche systématique permettant d'évaluer l'impact environnemental d'un produit, d'un processus ou d'un service tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de sa vie utile. Cette méthode considère les différentes étapes du cycle de vie, y compris la production, la distribution, l'utilisation et l'élimination, afin d'identifier et de quantifier les impacts environnementaux associés à chaque phase.

Catégorie : Elle se réfère à l'une des divisions d'un GBRS selon laquelle les bâtiment sont évalués. A titre exemple, « Efficacité énergétique » est l'une des neuf catégories de LEED.

Catégorie « Éthique et Équité » : Cette catégorie se concentre sur l'intégration de principes éthiques, de considérations d'équité, de normes sociales et de respect des droits fondamentaux. Elle vise à garantir une distribution équitable des avantages environnementaux, sociaux et économiques tout au long du processus de construction et d'utilisation des bâtiments.

Catégorie « Flexibilité » : Elle vise à favoriser la flexibilité de la conception des bâtiments, permettant ainsi une adaptation fonctionnelle pour répondre aux éventuels changements d'utilisation et de fonction. La flexibilité s'implique à travers des caractéristiques de conception telles que la facilité de répartition des cloisonnements et la possibilité d'ajuster le placement des installations de plomberie et circuits, entre autres.

Catégorie « Fonctionnalité et Facilité de Gestion » : Cette catégorie de l'évaluation des bâtiments se concentre sur la conception, la mise en œuvre et la gestion efficace des espaces bâtis pour répondre aux besoins des utilisateurs. Elle vise à créer des espaces adaptables et faciles à gérer tout au long de du cycle de vie des bâtiments.

Catégorie « Gestion intégrée » : Elle fait référence à l'approche globale adoptée pour gérer les différentes composantes et aspects du projet de construction ou de rénovation tout au long de son cycle de vie.

Catégorie « Habitabilité sociale » : Cette catégorie, dans l'évaluation des bâtiments, vise à garantir que les espaces construits favorisent des environnements sains, inclusifs et socialement viables pour les occupants et les communautés environnantes.

Catégorie « Héritage architectural » : Elle vise à prendre en compte la préservation, la valorisation et l'intégration du patrimoine architectural marocain lors de la conception et de la construction de nouveaux bâtiments.

Catégorie « Impacts sur le paysage » : Elle vise à évaluer l'impacts visuel et esthétique d'un projet du bâtiment sur son environnement naturel. L'objectif principal de cette catégorie est de minimiser les perturbations et les altérations du paysage environnant et de préserver l'intégrité visuelle.

Catégorie « Innovations vertes » : Innovation verte au cœur des réflexions en faveur d'une révolution durable dans le secteur du bâtiment. Elle offre des opportunités de reconnaissance de performance et d'innovation exemplaires qui ne sont pas incluses ou vont au-delà des exigences des critères d'évaluation.

Catégorie « Investissement » : cette catégorie concerne l'analyse des coûts et des bénéfices associés à la conception, la construction et l'exploitation d'un bâtiment. L'objectif principal de cette catégorie est d'évaluer la viabilité financière du projet en tenant compte des investissements nécessaires pour intégrer des solutions et des technologies durables.

Catégorie « Coûts au cours du cycle de vie » : Une évaluation du coût global du cycle de vie peut servir de base aux décisions d'investissement des utilisateurs, des promoteurs immobiliers, et des investisseurs. Certains coûts tels que les coûts d'exploitation et de maintenance ne sont pas disponibles au moment du calcul des coûts du cycle de vie et il est donc nécessaire de faire des prévisions sur la base de données solide.

Catégorie « Management et Documentation » : Elle évalue les processus organisationnels et les mesures de suivi nécessaires pour assurer la durabilité et la surveillance régulière des performances du bâtiment, y compris la maintenance préventive.

Catégorie « Santé et bien-être » : Des problèmes régionaux tels que, la sècheresse persistante aggravée la poussière, qui est une partie importante de source de pollution atmosphérique survenues dans les régions de sud au Maroc. Par ailleurs, les villes côtières sont confrontées à des taux d'humidité élevés dans les bâtiments mal aérés. Ainsi, l'objectif de cette catégorie est de mesurer les impacts sur la santé, le confort, le bien-être des occupants grâce à des conceptions et des aménagements favorables à la santé, tout en assurant un environnement intérieur sain pour les occupants du bâtiment.

Catégorie « Sécurité et sûreté » : Elle comprend la protection des points d'accès, des systèmes de surveillance et des contrôles d'accès aux bâtiments. Elle inclut toutes les mesures visant à prévenir ou à réduire les dommages liés à la sécurité.

Catégorie « Sélection du site » : Catégorie concerne le processus de choix de la parcelle du bâtiment. Son objectif principal est de privilégier les sites présentant des avantages environnementaux, tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement.

Catégorie « Transport alternatif » : Dans l'évaluation des bâtiments, cette catégorie se concentre sur la promotion de modes de transport durables et respectueux de l'environnement pour les occupants

et les utilisateurs du bâtiment. Son objectif principal est de réduire l'empreinte carbone associée aux déplacements en favorisant l'utilisation de moyens de transport moins polluants.

Catégorie « Abordabilité » : L'abordabilité est un contrains pour les promoteurs, les planificateurs et les responsables locaux. En raison des coûts élevés associés à la mise en œuvre des bâtiments durables ainsi que des diverses pressions économiques exercées sur les consommateurs marocains, il peut être difficile pour eux d'investir plus dans une démarche durable. Cela est particulièrement vrai pour les ménages à faible revenu, qui ont du mal à supporter des coûts supplémentaires tout en respectant les limites de leur budget.

Catégorie « Accessibilité » : La réalisation d'un projet de construction dans un environnement bâti existant a un impact sur la communauté environnante. Le choix du site peut avoir des effets importants sur le développement de la Communauté.

Catégorie « Aménagement du site » : Dans l'évaluation des bâtiments, cette catégorie évalue la manière dont un site est conçu, aménagé et développé pour maximiser son efficacité environnementale tout en répondant aux besoins fonctionnels et esthétiques du projet.

Critère ou attribut : Il fait référence à un élément de l'évaluation dans un GBRS donné qui relève d'une catégorie. A titre exemple : « Espace ouvert » est un critère d'évaluation de la catégorie « Site durable ».

Crédit ou score : Nous utilisons ces deux mots de manière interchangeable pour faire référence à l'évaluation appliquée aux attributs qui se voient attribuer une note ou un crédit. Certains attributs ou critères sont considérés comme des conditions préalables (prérequis). Chaque manuel GBRS détaille la méthodologie de notation.

Eau grise et noire : Désigne les eaux domestiques provenant de diverses sources, telles que les lavabos, les douches, les baignoires et les machines à laver. Contrairement à l'eau noire (eaux usées provenant des toilettes) qui est contaminée par des matières fécales. L'eau grise peut être traitée et réutilisée à des fins non potables, telles que l'arrosage des jardins, le lavage des véhicules ou le remplissage des chasses d'eau.

Empreinte carbone : Selon la norme ISO 14064, fait référence à la quantification totale des émissions de gaz à effet de serre (GES) directes et indirectes associées à une organisation, un produit, un service ou une activité. Elle mesure la contribution les activités humaines au changement climatique en termes d'équivalent en dioxyde de carbone (CO_2e).

Empreinte écologique : Selon le Global Footprint Network, est une mesure de la pression exercée par l'activité humaine sur les ressources naturelles de la planète. « Empreinte écologique (EE) » est le rapport entre les flux de ressources naturelles renouvelables utilisées par l'Homme et les capacités de renouvellement de celles-ci. L'EE est construite à partir de la consommation finale d'un pays et utilise

un module de conversion qui permet de calculer l'équivalent de ressources naturelles renouvelables consommées. L'unité d'équivalence utilisée est l'hectare d'écosystème consommé par un individu, une ville, une entreprise ou un pays.

Xéropaysage : C'est la création de jardins conçus pour réduire la consommation d'eau grâce à l'utilisation de ressources utiles pour la croissance optimale des espèces ornementales correspondantes.

RÉFÉRENCES

[1] IEA, UNEP, et GlobalABC, « GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050 », 2020.

[2] C.-L. Cheng, J.-J. Peng, M.-C. Ho, W.-J. Liao, et S.-J. Chern, « Evaluation of Water Efficiency in Green Building in Taiwan », *Water*, vol. 8, n° 6, p. 236, juin 2016, doi: 10.3390/w8060236.

[3] H. Danso, « Dimensions and Indicators for Sustainable Construction Materials: A Review », *RDMS*, vol. 3, n° 4, févr. 2018, doi: 10.31031/RDMS.2018.03.000568.

[4] Z. Luo, Y. Cang, N. Zhang, L. Yang, et J. Liu, « A quantitative process-based inventory study on material embodied carbon emissions of residential, office, and commercial buildings in China », *Journal of Thermal Science*, vol. 28, p. 1236-1251, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/s11630-019-1165-x.

[5] J. Solís-Guzmán, M. Marrero, et A. Ramírez-de-Arellano, « Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain) », *Ecological indicators*, vol. 25, p. 239-249, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.008.

[6] Y. Ansari, D. Husain, S. Haadi, J. Haloi, et R. Prakash, « Life cycle ecological footprint of building: a case study of low-rise tropical residential building », *International Journal of Environmental Science and Technology*, p. 1-16, 2022, doi: https://doi.org/10.1007/s13762-022-04518-9.

[7] S. Gawande, R. R. Tiwari, P. Narayanan, et A. Bhadri, « Indoor air quality and sick building syndrome: Are green buildings better than conventional buildings? », *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 24, n° 1, p. 30-32, avr. 2020, doi: 10.4103/ijoem.IJOEM_148_19.

[8] R. Alawneh, F. Ghazali, H. Ali, et A. F. Sadullah, « A Novel framework for integrating United Nations Sustainable Development Goals into sustainable non-residential building assessment and management in Jordan », *Sustainable Cities and Society*, vol. 49, p. 101612, août 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101612.

[9] T. O. Olawumi et D. W. M. Chan, « A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development », *Journal of Cleaner Production*, vol. 183, p. 231-250, mai 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.162.

[10] X. Zhao, J. Zuo, G. Wu, et C. Huang, « A bibliometric review of green building research 2000–2016 », *Architectural Science Review*, vol. 62, n° 1, janv. 2019, doi: 10.1080/00038628.2018.1485548.

[11] O. A. Oguntona, C. O. Aigbavboa, et W. D. Thwala, « A SCIENTOMETRIC ANALYSIS AND VISUALIZATION OF GREEN BUILDING RESEARCH IN AFRICA », *Journal of Green Building*, vol. 16, n° 2, p. 83-86, mars 2021, doi: 10.3992/jgb.16.2.83.

[12] R. Shad, M. Khorrami, et M. Ghaemi, « Developing an Iranian green building assessment tool using decision making methods and geographical information system: Case study in Mashhad city », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, p. 324-340, janv. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.004.

[13] G. S. Vyas, K. N. Jha, et D. A. Patel, « Development of Green Building Rating System Using AHP and Fuzzy Integrals: A Case of India », *J. Archit. Eng.*, vol. 25, n° 2, p. 04019004, juin 2019, doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000346.

[14] M. F. A. Al-Jebouri, A. K. Shaaban, S. N. Raman, et R. A. A. Bin O. K. Rahmat, « Framework of Environmental Rating System for Home Buildings in Oman », *J. Archit. Eng.*, vol. 23, n° 2, p. 04017003, juin 2017, doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000241.

[15] M. A. Anshebo, W. J. Mengesha, et D. L. Sokido, « Developing a Green Building Assessment Tool for Ethiopia », *Heliyon*, vol. 8, n° 9, p. e10569, sept. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10569.

[16] H. H. Ali et S. F. Al Nsairat, « Developing a green building assessment tool for developing countries – Case of Jordan », *Building and Environment*, vol. 44, n° 5, p. 1053-1064, mai 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.07.015.

[17] I. M. C. S. Illankoon, V. W. Y. Tam, K. N. Le, et L. Shen, « Key credit criteria among international green building rating tools », *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, p. 209-220, oct. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.206.

[18] Z. Ding *et al.*, « Green building evaluation system implementation », *Building and Environment*, vol. 133, p. 32-40, avr. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.02.012.

[19] M. Saunders, P. Lewis, et A. Thornhill, « Research Methods for Business Students' Chapter 4: Understanding research philosophy and approaches to theory development, Researchgate. Net », 2019.

[20] G. Wagner *et al.*, « Which factors affect the scientific impact of review papers in IS research? A scientometric study », *Information & Management*, vol. 58, n° 3, p. 103427, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.im.2021.103427.

[21] A. Darko, A. P. C. Chan, X. Huo, et D.-G. Owusu-Manu, « A scientometric analysis and visualization of global green building research », *Building and Environment*, vol. 149, p. 501-511, févr. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.12.059.

[22] I. Y. Wuni, G. Q. P. Shen, et R. Osei-Kyei, « Scientometric review of global research trends on green buildings in construction journals from 1992 to 2018 », *Energy and Buildings*, vol. 190, p. 69-85, mai 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.02.010.

[23] Y. Shi et X. Liu, « Research on the Literature of Green Building Based on the Web of Science: A Scientometric Analysis in CiteSpace (2002–2018) », *Sustainability*, vol. 11, n° 13, p. 3716, juill. 2019, doi: 10.3390/su11133716.

[24] N. J. van Eck et L. Waltman, « VOSviewer manual », *Manual for VOSviewer version*, vol. 1, n° 0, 2011.

[25] M. Leach, A. C. Stirling, et I. Scoones, *Dynamic Sustainabilities: Technology, Environment, Social Justice*. Taylor & Francis, 2010. doi: 10.4324/9781849775069.

[26] A. A. Lew, P. T. Ng, C. (Nickel) Ni, et T. (Emily) Wu, « Community sustainability and resilience: similarities, differences and indicators », *Tourism Geographies*, vol. 18, n° 1, p. 18-27, janv. 2016, doi: 10.1080/14616688.2015.1122664.

[27] S. Allemand, *Le développement durable: au regard de la prospective du présent*. Editions L'Harmattan, 2006.

[28] J. Elkington, « Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business », *Environmental quality management*, vol. 8, n° 1, p. 37-51, 1998, doi: https://doi.org/10.1002/tqem.3310080106.

[29] R. Lozano, « Envisioning sustainability three-dimensionally », *Journal of cleaner production*, vol. 16, n° 17, p. 1838-1846, 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.02.008.

[30] L. Shi, L. Han, F. Yang, et L. Gao, « The evolution of sustainable development theory: Types, goals, and research prospects », *Sustainability*, vol. 11, n° 24, p. 7158, 2019, doi: http://dx.doi.org/10.3390/su11247158.

[31] C. C. Williams et A. C. Millington, « The diverse and contested meanings of sustainable development », *Geographical Journal*, vol. 170, n° 2, p. 99-104, 2004, doi: https://doi.org/10.1111/j.0016-7398.2004.00111.x.

[32] M. A. Khan, C. C. Wang, et C. L. Lee, « A Framework for Developing Green Building Rating Tools Based on Pakistan's Local Context », *Buildings*, vol. 11, n° 5, p. 202, mai 2021, doi: 10.3390/buildings11050202.

[33] I. C. Garretson, M. Mani, S. Leong, K. W. Lyons, et K. R. Haapala, « Terminology to support manufacturing process characterization and assessment for sustainable production », *Journal of Cleaner Production*, vol. 139, p. 986-1000, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.103.

[34] K. Lynch, *Good city form*. MIT press, 1984.

[35] I. McHarg et L. Mumford, « Design with nature: American Museum of Natural History New York », 1969.

[36] U. G. B. COUNCIL, « LEED Methodology », *Washington DC: US Green Building Council*, 1993.

[37] C. J. Kibert, *Sustainable construction: green building design and delivery*. John Wiley & Sons, 2016.

[38] « ISO 15392:2019 - Sustainability in buildings and civil engineering works — General principles ». 9 février 2021. Consulté le: 25 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.iso.org/standard/69947.html

[39] J. Yoshida et A. Sugiura, « Which "greenness" is valued? Evidence from green condominiums in Tokyo », 2010.

[40] « What is a Sustainable Built Environment? », World Green Building Council. Consulté le: 26 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://worldgbc.org/what-is-a-sustainable-built-environment/

[41] J. A. Vanegas, J. R. DuBose, et A. R. Pearce, « Sustainable technologies for the building construction industry », présenté à Proceedings, Symposium on Design for the Global Environment, Atlanta, GA, 1996.

[42] M. R. Darabpour, M. Darabpour, J. Majrouhi Sardroud, J. Smallwood, et G. Tabarsa, « Practical Approaches Toward Sustainable Development in Iranian Green Construction », *CivileJournal*, vol. 4, n° 10, p. 2450, oct. 2018, doi: 10.28991/cej-03091172.

[43] W. Pan, C. Yu, et J. Du, « A dialectical system framework for green building assessment in high-density cities », *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 97, p. 106860, nov. 2022, doi: 10.1016/j.eiar.2022.106860.

[44] R. K. Zimmermann, O. Skjelmose, K. G. Jensen, K. K. Jensen, et H. Birgisdottir, « Categorizing Building Certification Systems According to the Definition of Sustainable Building », *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 471, p. 092060, févr. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/471/9/092060.

[45] G. H. Bruno Polli, A. M. Vaz Duarte Oliveira e Sá, et B. Pavani Biju, « Qualitative Analysis of Sustainability Certification Systems Based on ISO 21929-1 », *UPjeng*, vol. 8, n° 4, p. 47-64, juill. 2022, doi: 10.24840/2183-6493_008.004_0006.

[46] T. Ahmad et M. J. Thaheem, « Developing a residential building-related social sustainability assessment framework and its implications for BIM », *Sustainable Cities and Society*, vol. 28, p. 1-15, janv. 2017, doi: 10.1016/j.scs.2016.08.002.

[47] A. Sharma, A. Saxena, M. Sethi, V. Shree, et Varun, « Life cycle assessment of buildings: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n° 1, p. 871-875, janv. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.09.008.

[48] S. Geng, Y. Wang, J. Zuo, Z. Zhou, H. Du, et G. Mao, « Building life cycle assessment research: A review by bibliometric analysis », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, p. 176-184, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.068.

[49] A. Zamagni, H.-L. Pesonen, et T. Swarr, « From LCA to Life Cycle Sustainability Assessment: concept, practice and future directions », *Int J Life Cycle Assess*, vol. 18, n° 9, p. 1637-1641, nov. 2013, doi: 10.1007/s11367-013-0648-3.

[50] E.-H. Drissi Lamrhari et B. Benhamou, « Thermal behavior and energy saving analysis of a flat with different energy efficiency measures in six climates », *Build. Simul.*, vol. 11, n° 6, p. 1123-1144, déc. 2018, doi: 10.1007/s12273-018-0467-3.

[51] L. N. Dwaikat et K. N. Ali, « Green buildings life cycle cost analysis and life cycle budget development: Practical applications », *Journal of Building Engineering*, vol. 18, p. 303-311, juill. 2018, doi: 10.1016/j.jobe.2018.03.015.

[52] A. Arrigoni, M. Zucchinelli, D. Collatina, et G. Dotelli, « Life cycle environmental benefits of a forward-thinking design phase for buildings: the case study of a temporary pavilion built for an

international exhibition », *Journal of Cleaner Production*, vol. 187, p. 974-983, juin 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.230.

[53] J. P. Carvalho, L. Bragança, et R. Mateus, « Automating building sustainability assessment using building information modelling: A case study », *Journal of Building Engineering*, vol. 76, p. 107228, oct. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107228.

[54] B. Peuportier, S. Thiers, et A. Guiavarch, « Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment », *Journal of Cleaner Production*, vol. 39, p. 73-78, janv. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.08.041.

[55] R. Minunno, T. O'Grady, G. M. Morrison, et R. L. Gruner, « Investigating the embodied energy and carbon of buildings: A systematic literature review and meta-analysis of life cycle assessments », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, p. 110935, juin 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110935.

[56] A. Di Maria, M. Salman, M. Dubois, et K. Van Acker, « Life cycle assessment to evaluate the environmental performance of new construction material from stainless steel slag », *Int J Life Cycle Assess*, vol. 23, n° 11, p. 2091-2109, nov. 2018, doi: 10.1007/s11367-018-1440-1.

[57] Z. Xue, H. Liu, Q. Zhang, J. Wang, J. Fan, et X. Zhou, « The Impact Assessment of Campus Buildings Based on a Life Cycle Assessment–Life Cycle Cost Integrated Model », *Sustainability*, vol. 12, n° 1, p. 294, déc. 2019, doi: 10.3390/su12010294.

[58] D. Fatourehchi et E. Zarghami, « Social sustainability assessment framework for managing sustainable construction in residential buildings », *Journal of Building Engineering*, vol. 32, p. 101761, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101761.

[59] E. Yousri, A. E. B. Sayed, M. A. Farag, et A. M. Abdelalim, « Risk Identification of Building Construction Projects in Egypt », *Buildings*, vol. 13, n° 4, p. 1084, 2023, doi: 10.3390/buildings13041084.

[60] I. Benchanna, « Sécurité des ouvriers : la responsabilité est partagée entre les opérateurs et les autorités publiques - La Vie éco », https://www.lavieeco.com/. Consulté le: 29 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.lavieeco.com/affaires/securite-des-ouvriers-la-responsabilite-est-partagee-entre-les-operateurs-et-les-autorites-publiques/

[61] M. Y. Han, G. Q. Chen, J. Meng, X. D. Wu, A. Alsaedi, et B. Ahmad, « Virtual water accounting for a building construction engineering project with nine sub-projects: a case in E-town, Beijing », *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, p. 4691-4700, janv. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.048.

[62] M. Mannan et S. G. Al-Ghamdi, « Environmental impact of water-use in buildings: Latest developments from a life-cycle assessment perspective », *Journal of Environmental Management*, vol. 261, p. 110198, mai 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110198.

[63] P. W. Gerbens-Leenes, A. Y. Hoekstra, et R. Bosman, « The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass », *Water Resources and Industry*, vol. 19, p. 1-12, juin 2018, doi: 10.1016/j.wri.2017.11.002.

[64] P. MacNaughton *et al.*, « The impact of working in a green certified building on cognitive function and health », *Building and Environment*, vol. 114, p. 178-186, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.11.041.

[65] J. Jiang *et al.*, « From prospecting to mining: A review of enabling technologies, LCAs, and LCCAs for improved construction and demolition waste management », *Waste Management*, vol. 159, p. 12-26, 2023.

[66] S. Zanni, I. M. Simion, M. Gavrilescu, et A. Bonoli, « Life Cycle Assessment Applied to Circular Designed Construction Materials », *Procedia CIRP*, vol. 69, p. 154-159, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.11.040.

[67] I. C. S. Illankoon et V. W. Tam, « Life Cycle Costing for Decision Making in Construction and Demolition Waste Management: A Critical Review », p. 163-169, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-48465-1_28.

[68] T. Wang, J. Wang, P. Wu, J. Wang, Q. He, et X. Wang, « Estimating the environmental costs and benefits of demolition waste using life cycle assessment and willingness-to-pay: A case study in Shenzhen », *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, p. 14-26, janv. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.168.

[69] R. Assadiki, G. Merlin, H. Boileau, C. Buhé, et F. Belmir, « Status and Prospects of Green Building in the Middle East and North Africa (MENA) Region with a Focus on the Moroccan Context », *Sustainability*, vol. 14, n° 19, p. 12594, oct. 2022, doi: 10.3390/su141912594.

[70] Saleh. H. Alyami, Y. Rezgui, et A. Kwan, « Developing sustainable building assessment scheme for Saudi Arabia: Delphi consultation approach », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 43-54, nov. 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.011.

[71] S. H. Alyami et Y. Rezgui, « Sustainable building assessment tool development approach », *Sustainable Cities and Society*, vol. 5, p. 52-62, déc. 2012, doi: 10.1016/j.scs.2012.05.004.

[72] S. Alyami, « The development of sustainable assessment method for Saudi Arabia built environment », *Sustainability Science*, vol. volume 10, n° 167-178, 2015, doi: ttps://doi.org/10.1007/s11625-014-0252-x.

[73] E. Zarghami, H. Azemati, D. Fatourehchi, et M. Karamloo, « Customizing well-known sustainability assessment tools for Iranian residential buildings using Fuzzy Analytic Hierarchy Process », *Building and Environment*, vol. 128, p. 107-128, janv. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.032.

[74] E. Zarghami, D. Fatourehchi, et M. Karamloo, « Establishing a region-based rating system for multi-family residential buildings in Iran: A holistic approach to sustainability », *Sustainable Cities and Society*, vol. 50, p. 101631, oct. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101631.

[75] F. Mneimneh, H. Hamdan, et A. Mourtada, « GRASS: A new building rating system for Lebanon », présenté à 2012 International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), IEEE, 2012, p. 1-7.

[76] N. Lazar et K. Chithra, « A comprehensive literature review on development of Building Sustainability Assessment Systems », *Journal of Building Engineering*, vol. 32, p. 101450, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101450.

[77] J. El-Ouahi, N. Robinson-García, et R. Costas, « Analyzing scientific mobility and collaboration in the Middle East and North Africa », *Quantitative Science Studies*, vol. 2, n° 3, p. 1023-1047, 2021.

[78] F. Kokabisaghi *et al.*, « Impact of United States political sanctions on international collaborations and research in Iran », *BMJ global health*, vol. 4, n° 5, p. e001692, 2019, doi: https://doi.org/10.1136/bmjgh-2019-001692.

[79] S. Slaoui, K. Karibi, N. T. Mekaoui, et K. El Harrouni, « Sustainable Architecture and Energy Efficiency a University Campus Project in Fez City, Morocco », in *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017)*, vol. 6, S. Fırat, J. Kinuthia, et A. Abu-Tair, Éd., in Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 6. , Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 65-79. doi: 10.1007/978-3-319-63709-9_6.

[80] Y. EL Fouih, A. Allouhi, J. Abdelmajid, T. Kousksou, et Y. Mourad, « Post Energy Audit of Two Mosques as a Case Study of Intermittent Occupancy Buildings: Toward more Sustainable Mosques », *Sustainability*, vol. 12, n° 23, p. 10111, déc. 2020, doi: 10.3390/su122310111.

[81] « Homepage | Globalabc ». Consulté le: 4 septembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://globalabc.org/

[82] I. Hamilton *et al.*, « 2021 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION », United Nations Avenue, Gigirl,Kenya, 2021.

[83] Government of Dubai, « Green Building Regulations & Specifications », *university of SHARJAH*. p. 1-75, 2016.

[84] « Morocco - Countries & Regions », IEA. Consulté le: 16 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.iea.org/countries/morocco

[85] L. Boumahrou, « Energie au Maroc, quoi de neuf en 2020 ? » Consulté le: 31 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://ecoactu.ma/energie-au-maroc/

[86] Z. Romani, « Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants à haute efficacité énergétique », Université de La Rochelle; Université Abdelmalek Essaâdi, Tanger, 2015. [En ligne]. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-01373443

[87] Y. MAAROUFI, « Les Indicateurs sociaux du Maroc, Edition 2023 », Site institutionnel du Haut-Commissariat au Plan du Royaume du Maroc. Consulté le: 23 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.hcp.ma/Les-Indicateurs-sociaux-du-Maroc-Edition-2023_a3729.html

[88] « Sustainable Development Report 2023 ». Consulté le: 23 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://dashboards.sdgindex.org/

[89] « Sustainable Development-Morocco, 2023 ». Consulté le: 23 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://dashboards.sdgindex.org/profiles/morocco

[90] C. Gauthier, « L'HABITAT AU MAROC : SITUATION DU PARC DE LOGEMENTS ET STATUT D'OCCUPATION », Site institutionnel du Haut-Commissariat au Plan du Royaume du Maroc. Consulté le: 3 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.hcp.ma/Note-d-information-du-Haut-Commissariat-au-Plan-sur-le-parc-de-logements-au-Maroc-a-l-occasion-de-la-journee-mondiale-de_a2020.html

[91] « Le Reporting climatique ». Consulté le: 24 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.environnement.gov.ma/fr/climat?showall=

[92] Ministère de l'Energie des Mines de l'Eau et de l'Environnement du Maroc, « Contribution Déterminée au niveau National-actualisée », 2021.

[93] R. Assadiki et F. Belmir, « Current Situation of Green Building Development in Morocco: Standards and Certification Systems », in *Digital Technologies and Applications*, S. Motahhir et B. Bossoufi, Éd., in Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer International Publishing, 2022, p. 563-572. doi: 10.1007/978-3-031-01942-5_56.

[94] Department of Housing and City Policy, « BUILDINGS | ENERGETIC EFFICIENCY ». Consulté le: 13 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: http://www.mhpv.gov.ma/?page_id=3605

[95] IMANOR, « Guide Développement Durable dans la Construction ». 2020.

[96] M. E. Q. Basma M'LAHFI, D AMEGOUZ, « A new approach for the mandatory application of the thermal regulation of construction (RTCM) in the future moroccan buildings », *SN Applied Sciences*, n° August, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03367-w.

[97] N. Sakami, L. Boukhattem, H. Hamdi, et B. Benhamou, « Comparison of shallow basement thermal performance for different regions of Morocco using a three-dimensional heat transfer analysis », *Cogent Engineering*, vol. 6, n° 1, p. 1602926, 2019, doi: https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1602926.

[98] Z. Romani, A. Draoui, et F. Allard, « Metamodeling the heating and cooling energy needs and simultaneous building envelope optimization for low energy building design in Morocco », *Energy and Buildings*, vol. 102, p. 139-148, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.014.

[99] A. O. Windapo et J. S. Goulding, « Understanding the gap between green building practice and legislation requirements in South Africa », *Smart and Sustainable Built Environment*, vol. 4, n° 1, p. 67-96, mai 2015, doi: 10.1108/SASBE-01-2014-0002.

[100] E. D. Omopariola, O. I. Olanrewaju, I. Albert, A. E. Oke, et S. B. Ibiyemi, « Sustainable construction in the Nigerian construction industry: unsustainable practices, barriers and strategies », *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2022, doi: https://doi.org/10.1108/JEDT-11-2021-0639.

[101] L. B. Cole, « The Teaching Green Building: Five Theoretical Perspectives », in *Handbook of Sustainability and Social Science Research*, W. Leal Filho, R. W. Marans, et J. Callewaert, Éd., in World Sustainability Series. , Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 107-125. doi: 10.1007/978-3-319-67122-2_6.

[102] S. Tokbolat, F. Karaca, S. Durdyev, et R. K. Calay, « Construction professionals' perspectives on drivers and barriers of sustainable construction », *Environment, Development and Sustainability*, vol. 22, n° 5, p. 4361-4378, 2020, doi: 10.1007/s10668-019-00388-3.

[103] A. Karji, M. Namian, et M. Tafazzoli, « Identifying the key barriers to promote sustainable construction in the United States: A principal component analysis », *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, n° 12, 2020, doi: 10.3390/su12125088.

[104] A. Darko, C. Zhang, et A. P. C. Chan, « Drivers for green building: A review of empirical studies », *Habitat International*, vol. 60, p. 34-49, 2017, doi: 10.1016/j.habitatint.2016.12.007.

[105] A. Oke, D. Aghimien, C. Aigbavboa, et C. Musenga, « Drivers of sustainable construction practices in the Zambian construction industry », *Energy Procedia*, vol. 158, p. 3246-3252, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.995.

[106] S. Durdyev, S. R. Mohandes, A. Mahdiyar, et S. Ismail, « What drives clients to purchase green building?: The cybernetic fuzzy analytic hierarchy process approach », *ECAM*, vol. 29, n° 10, p. 4015-4039, déc. 2022, doi: 10.1108/ECAM-11-2020-0945.

[107] B. T. H. Lim, A. Z. J. Liu, et B. L. Oo, « Awareness and practices of sustainable construction in Australia: Consultant quantity surveyors' perception », *AIP Conference Proceedings*, vol. 2124, n° July, 2019, doi: 10.1063/1.5117120.

[108] A. P. C. Chan, A. Darko, A. O. Olanipekun, et E. E. Ameyaw, « Critical barriers to green building technologies adoption in developing countries: The case of Ghana », *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, p. 1067-1079, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.235.

[109] B. C. L. Yin, R. Laing, M. Leon, et L. Mabon, « An evaluation of sustainable construction perceptions and practices in Singapore », *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, n° December 2017, p. 613-620, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.03.024.

[110] S. K. Alfaiz, S. B. A. Karim, et A. M. Alashwal, « Critical success factors of green building retrofitting ventures in iraq », *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, vol. 12, n° 1, p. 12-17, 2021, doi: 10.30880/ijscet.2021.12.01.002.

[111] S. Alsanad, « Awareness, Drivers, Actions, and Barriers of Sustainable Construction in Kuwait », in *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction Awareness*, Elsevier B.V., 2015, p. 969-983. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.538.

[112] Q. Shi, J. Zuo, R. Huang, J. Huang, et S. Pullen, « Identifying the critical factors for green construction - An empirical study in China », *Habitat International*, vol. 40, n° October, p. 1-8, 2013, doi: 10.1016/j.habitatint.2013.01.003.

[113] A. Serpell, J. Kort, et S. Vera, « Awareness, actions, drivers and barriers of sustainable construction in Chile », *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 19, n° 2, p. 272-288, 2013, doi: 10.3846/20294913.2013.798597.

[114] S. D. Djokoto, J. Dadzie, et E. Ohemeng-Ababio, « Barriers to sustainable construction in the ghanaian construction industry: Consultants perspectives », *Journal of Sustainable Development*, vol. 7, n° 1, p. 134-143, 2014, doi: 10.5539/jsd.v7n1p134.

[115] M. Pitt, M. Tucker, M. Riley, et J. Longden, « Towards sustainable construction: Promotion and best practices », *Construction Innovation*, vol. 9, n° 2, p. 201-224, 2009, doi: 10.1108/14714170910950830.

[116] T. Häkkinen et K. Belloni, « Barriers and drivers for sustainable building », *Building Research and Information*, vol. 39, n° 3, p. 239-255, 2011, doi: 10.1080/09613218.2011.561948.

[117] P. Tunji-Olayeni, K. Kajimo-Shakantu, et E. Osunrayi, « Practitioners' experiences with the drivers and practices for implementing sustainable construction in Nigeria: a qualitative assessment », *Smart and Sustainable Built Environment*, vol. 9, n° 4, p. 443-465, 2020, doi: 10.1108/SASBE-11-2019-0146.

[118] R. J. Marsh, A. C. Brent, et I. H. de Kock, « An integrative review of the potential barriers to and drivers of adopting and implementing sustainable construction in south africa », *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 31, n° 3, p. 24-35, 2020, doi: 10.7166/31-3-2417.

[119] S. Durdyev, E. K. Zavadskas, D. Thurnell, A. Banaitis, et A. Ihtiyar, « Sustainable construction industry in Cambodia: Awareness, drivers and barriers », *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, n° 2, p. 1-19, 2018, doi: 10.3390/su10020392.

[120] O. Manoliadis, I. Tsolas, et A. Nakou, « Sustainable construction and drivers of change in Greece: A Delphi study », *Construction Management and Economics*, vol. 24, n° 2, p. 113-120, 2006, doi: 10.1080/01446190500204804.

[121] P. I. Louangrath, « Reliability and Validity of Survey Research », *Inter. J. Res. Methodol. Soc. Sci.*, vol. 4, n° 1, p. 50-62, 2018.

[122] R. MUNDRY et J. FISCHER, « Use of statistical programs for nonparametric tests of small samples often leads to incorrect Pvalues: examples from animal behaviour », *Animal behaviour*, vol. 56, n° 1, p. 256-259, 1998.

[123] « Au Maroc, plus de 10 millions de femmes en dehors du marché du travail (HCP) », Médias24. Consulté le: 15 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://medias24.com/2020/03/07/au-maroc-plus-de-10-millions-de-femmes-en-dehors-du-marche-du-travail-hcp/

[124] L. Kaufman et P. J. Rousseeuw, *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*. John Wiley & Sons, 2009.

[125] S. Berry, K. Davidson, et W. Saman, « The impact of niche green developments in transforming the building sector: The case study of Lochiel Park », *Energy Policy*, vol. 62, p. 646-655, nov. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.067.

[126] S. Yin et B. Li, « Transferring green building technologies from academic research institutes to building enterprises in the development of urban green building: A stochastic differential game approach », *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, n° October 2017, p. 631-638, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.03.025.

[127] P. T. I. Lam, E. H. W. Chan, C. K. Chau, C. S. Poon, et K. P. Chun, « Integrating green specifications in construction and overcoming barriers in their use », *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, vol. 135, n° 4, p. 142-152, 2009, doi: 10.1061/(ASCE)1052-3928(2009)135:4(142).

[128] D. Zhao, B. He, C. Johnson, et B. Mou, « Social problems of green buildings : From the humanistic needs to social acceptance », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, p. 1594-1609, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.072.

[129] X. Zhao, B. G. Hwang, et Y. Gao, « A fuzzy synthetic evaluation approach for risk assessment: A case of Singapore's green projects », *Journal of Cleaner Production*, vol. 115, n° January 2005, p. 203-213, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.042.

[130] B. Hwang, M. Shan, N. Nadiah, et B. Supa, « Green commercial building projects in Singapore : Critical risk factors and mitigation measures », *Sustainable Cities and Society*, vol. 30, p. 237-247, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.01.020.

[131] M. Assad, O. Hosny, A. Elhakeem, et S. El Haggar, « Green building design in Egypt from cost and energy perspectives », *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 11, n° 1, p. 21-40, 2015, doi: 10.1080/17452007.2013.775100.

[132] M. Landgren, S. Skovmand Jakobsen, B. Wohlenberg, et L. M. B. Jensen, « Integrated design processes–a mapping of guidelines with Danish conventional 'silo'design practice as the reference point », *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 15, nº 4, p. 233-248, 2019.

[133] K. Govindan, M. Kaliyan, D. Kannan, et A. N. Haq, « Barriers analysis for green supply chain management implementation in Indian industries using analytic hierarchy process », *International Journal of Production Economics*, vol. 147, p. 555-568, janv. 2014, doi: 10.1016/j.ijpe.2013.08.018.

[134] C. Y. Sun, Y. G. Chen, R. J. Wang, S. C. Lo, J. T. Yau, et Y. W. Wu, « Construction cost of green building certified residence: A case study in Taiwan », *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, nº 8, p. 21-25, 2019, doi: 10.3390/su11082195.

[135] D. Assylbekov, A. Nadeem, M. A. Hossain, G. Akhanova, et M. Khalfan, « Factors Influencing Green Building Development in Kazakhstan », *Buildings*, vol. 11, nº 12, p. 634, déc. 2021, doi: 10.3390/buildings11120634.

[136] G.-B. Department, « Summary of Gross Floor Area (GFA) Concessions and Related Information of Private Developments ». Consulté le: 19 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.bd.gov.hk/en/resources/codes-and-references/notices-and-reports/GFA.html

[137] « Green Mark Incentive Schemes », BCA Corp. Consulté le: 21 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www1.bca.gov.sg/buildsg/sustainability/green-mark-incentive-schemes

[138] B. A. Brotman, « The feasibility of medical office building green upgrades from an owner/lessor perspective », *Journal of Property Investment & Finance*, vol. 34, nº 4, p. 375-386, 2016, doi: https://doi.org/10.1108/JPIF-03-2016-0017.

[139] A. O. Windapo, « Examination of green building drivers in the South African construction industry: Economics versus ecology », *Sustainability (Switzerland)*, vol. 6, nº 9, p. 6088-6106, 2014, doi: 10.3390/su6096088.

[140] A. T. M. Mohamed Ahachad, « État des lieux : l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables dans le bâtiment au Maroc : emploi, valeur locale, qualification et effet économiques », 2013. Consulté le: 10 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: http://www.abhatoo.net.ma/maalama-textuelle/developpement-durable/economie-durable/energie/maitrise-de-l-energie/etat-des-lieux-l-efficacite-energetique-et-les-energies-renouvelables-dans-le-batiment-au-maroc-emploi-valeur-locale-qualification-et-effet-economiques

[141] A. S. Weerasinghe, T. Ramachandra, et J. O. B. Rotimi, « Comparative life-cycle cost (LCC) study of green and traditional industrial buildings in Sri Lanka », *Energy and Buildings*, vol. 234, p. 110732, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110732.

[142] X. Zhang, L. Shen, et Y. Wu, « Green strategy for gaining competitive advantage in housing development: a China study », *Journal of cleaner production*, vol. 19, nº 2-3, p. 157-167, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.005.

[143] E. H. W. Chan, Q. K. Qian, et P. T. I. Lam, « The market for green building in developed Asian cities-the perspectives of building designers », *Energy Policy*, vol. 37, nº 8, p. 3061-3070, 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2009.03.057.

[144] N. Murtagh, A. Roberts, et R. Hind, « The relationship between motivations of architectural designers and environmentally sustainable construction design », *Construction management and economics*, vol. 34, nº 1, p. 61-75, 2016.

[145] L. B. Cole, « The Teaching Green School Building: Exploring The Contributions of School Design to Informal Environmental Education », University of Michigan, United States, 2013. [En ligne]. Disponible sur: https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/100038/laurbria_1.pdf?sequence=1

[146] « Detail Rankings 2022 - Mohammed V University In Rabat - UI GreenMetric ». Consulté le: 24 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://greenmetric.ui.ac.id/rankings/overall-rankings-2022/um5.ac.ma

[147] K. P. Ziliya et U. Faisal, « Effect of Motivators & Barriers on Green Building Intention: Architects' Perspectives », *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, vol. 12, nº 13, p. 11A13S1-11A13S8, 2021.

[148] A. Kaklauskas, N. Lepkova, S. Raslanas, I. Vetloviene, V. Milevicius, et J. Sepliakov, « COVID-19 and green housing: a review of relevant literature », *Energies*, vol. 14, nº 8, p. 2072, 2021, doi: doi:10.3390/en14082072.

[149] B. Wang, T. T. Ã, Y. Yamasaki, N. Sakano, D. Wang, et K. Ogino, « Symptom definitions for SBS (sick building syndrome) in residential dwellings », vol. 211, p. 114-120, 2008, doi: 10.1016/j.ijheh.2007.03.004.

[150] A. Darko, A. P. C. Chan, Y. Yang, M. Shan, B.-J. He, et Z. Gou, « Influences of barriers, drivers, and promotion strategies on green building technologies adoption in developing countries: The Ghanaian case », *Journal of Cleaner Production*, vol. 200, p. 687-703, nov. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.318.

[151] P. MacNaughton *et al.*, « Energy savings, emission reductions, and health co-benefits of the green building movement », *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 28, nº 4, p. 307-318, 2018, doi: 10.1038/s41370-017-0014-9.

[152] W. Eisenstein, G. Fuertes, S. Kaam, K. Seigel, E. Arens, et L. Mozingo, « Climate co-benefits of green building standards: water, waste and transportation », *Building Research and Information*, vol. 45, nº 8, p. 828-844, 2017, doi: 10.1080/09613218.2016.1204519.

[153] R. Hay et C. Ostertag, « Life cycle assessment (LCA) of double-skin façade (DSF) system with fiber-reinforced concrete for sustainable and energy-efficient buildings in the tropics », *Building and Environment*, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.06.024.

[154] W. Lu, X. Chen, Y. Peng, et X. Liu, « The effects of green building on construction waste minimization: Triangulating 'big data' with 'thick data' », *Waste Management*, vol. 79, p. 142-152, sept. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.07.030.

[155] I. Mosly, « Barriers to the Diffusion and Adoption of Green Buildings in Saudi Arabia », *Journal of Management and Sustainability*, vol. 5, nº 4, p. 104, 2015, doi: 10.5539/jms.v5n4p104.

[156] A. Fathalizadeh, M. R. Hosseini, S. S. Vaezzadeh, D. J. Edwards, I. Martek, et S. Shooshtarian, « Barriers to sustainable construction project management: the case of Iran », *Smart and Sustainable Built Environment*, nº July, 2021, doi: 10.1108/SASBE-09-2020-0132.

[157] M. S. Saleh et C. Alalouch, « Towards Sustainable Construction in Oman: Challenges & Opportunities », in *Procedia Engineering*, Elsevier B.V., 2015, p. 177-184. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.416.

[158] H. H. Ali et A. A. Alkayed, « Constrains and barriers of implementing sustainability into architectural professional practice in Jordan », *Alexandria Engineering Journal*, vol. 58, nº 3, p. 1011-1023, 2019, doi: 10.1016/j.aej.2019.09.003.

[159] Y. Zhang *et al.*, « A survey of the status and challenges of green building development in various countries », *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, nº 19, p. 1-29, 2019, doi: 10.3390/su11195385.

[160] H. A. Bassioni, W. Kamel, A. H. El-din, et N. Abdelrahman, « Barriers, drivers and stakeholders of environmental management systems implementation in Egypt », présenté à FISC, Egypt, 2010.

[161] N. Z. Abidin et A. Powmya, « Perceptions on motivating factors and future prospects of green construction in Oman », *Journal of Sustainable Development*, vol. 7, nº 5, p. 231-239, 2014, doi: 10.5539/jsd.v7n5p231.

[162] Y. H. Ahn, A. R. Pearce, Y. Wang, et G. Wang, « Drivers and barriers of sustainable design and construction: The perception of green building experience », *International Journal of*

Sustainable Building Technology and Urban Development, vol. 4, n° 1, p. 35-45, mars 2013, doi: 10.1080/2093761X.2012.759887.

[163] M. Andelin, A.-L. Sarasoja, T. Ventovuori, et S. Junnila, « Breaking the circle of blame for sustainable buildings–evidence from Nordic countries », *Journal of corporate real estate*, p. 26-45, 2015, doi: 10.1108/JCRE-05-2014-0013.

[164] « AMEE | Efficacité énergétique dans le bâtiment ». Consulté le: 29 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.amee.ma/fr/expertise/batiment

[165] Y. Li, X. Chen, X. Wang, Y. Xu, et P.-H. Chen, « A review of studies on green building assessment methods by comparative analysis », *Energy and Buildings*, vol. 146, p. 152-159, juill. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.076.

[166] T. Sartori, R. Drogemuller, S. Omrani, et F. Lamari, « A schematic framework for Life Cycle Assessment (LCA) and Green Building Rating System (GBRS) », *Journal of Building Engineering*, vol. 38, p. 102180, juin 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102180.

[167] M. Braulio-Gonzalo, A. Jorge-Ortiz, et M. D. Bovea, « How are indicators in Green Building Rating Systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings? », *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 95, n° April, p. 106793, 2022, doi: 10.1016/j.eiar.2022.106793.

[168] « BREEAM Projects ». Consulté le: 12 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://tools.breeam.com/projects/explore/companies.jsp

[169] « Resources | U.S. Green Building Council ». Consulté le: 8 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.usgbc.org/resources

[170] « Famille HQE BATIMENT DURABLE », Certivéa. Consulté le: 8 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://certivea.fr/solutions/hqe-batiment-durable/

[171] X. Li, W. Feng, X. Liu, et Y. Yang, « A comparative analysis of green building rating systems in China and the United States », *Sustainable Cities and Society*, vol. 93, p. 104520, juin 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104520.

[172] « BREEAM - BRE Group ». Consulté le: 8 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://bregroup.com/products/breeam/

[173] M. Wallhagen, M. Glaumann, O. Eriksson, et U. Westerberg, « Framework for detailed comparison of building environmental assessment tools », *Buildings*, vol. 3, n° 1, p. 39-60, 2013, doi: 10.3390/buildings3010039.

[174] H. J. Kang et E. K. Rhee, « A Comparative Analysis of Performance Assessment Tools for Establishing Evaluation Framework for Sustainable Buildings », vol. 16, n° 4, p. 131-137, 2014, doi: http://dx.doi.org/10.5659/AIKAR.2014.16.4.131.

[175] L. Liang, B. Wen, F. Xu, J. Yan, X. Yan, et S. Ramesh, « Linking the development of building sustainability assessment tools with the concept evolution of sustainable buildings », *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, n° 22, 2021, doi: 10.3390/su132212909.

[176] S. Mahmoud, T. Zayed, et M. Fahmy, « Development of sustainability assessment tool for existing buildings », *Sustainable Cities and Society*, vol. 44, p. 99-119, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2018.09.024.

[177] J. Gabe et P. H. Christensen, *Information or Marketing? Lessons from the History of Private-Sector Green Building Labelling*. 2019. doi: 10.1007/978-3-319-94565-1_6.

[178] S. Ferrari, M. Zoghi, T. Blázquez, et G. Dall'O, « New Level(s) framework: Assessing the affinity between the main international Green Building Rating Systems and the european scheme », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, n° June 2021, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111924.

[179] O. Awadh, « Sustainability and green building rating systems: LEED, BREEAM, GSAS and Estidama critical analysis », *Journal of Building Engineering*, vol. 11, p. 25-29, 2017, doi: 10.1016/j.jobe.2017.03.010.

[180] Y. Pamu et M. Kona, « A Comparative Study on Green Building Rating Systems in India in terms of Energy and Water », *CVR Journal of Science & Technology*, vol. 16, n° 1, p. 26-31, 2019, doi: 10.32377/cvrjst1604.

[181] E. Zarghami et D. Fatourehchi, « Comparative analysis of rating systems in developing and developed countries : A systematic review and a future agenda towards a region- based sustainability assessment », *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, p. 120024, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120024.

[182] « HQE-BD Construction », Certivéa. Consulté le: 21 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://certivea.fr/certifications/hqe-bd-construction/

[183] W. S. E. Ismaeel, « Midpoint and endpoint impact categories in Green building rating systems », *Journal of Cleaner Production*, vol. 182, p. 783-793, mai 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.217.

[184] S. Assefa, H.-Y. Lee, et F.-J. Shiue, « Sustainability Performance of Green Building Rating Systems (GBRSs) in an Integration Model », *Buildings*, vol. 12, n° 2, p. 208, févr. 2022, doi: 10.3390/buildings12020208.

[185] T. Nuuter, I. Lill, et L. Tupenaite, « Comparison of housing market sustainability in European countries based on multiple criteria assessment », *Land Use Policy*, vol. 42, p. 642-651, janv. 2015, doi: 10.1016/j.landusepol.2014.09.022.

[186] J. Andrade et L. Bragança, « Sustainability assessment of dwellings – a comparison of methodologies », *Civil Engineering and Environmental Systems*, vol. 33, n° 2, p. 125-146, avr. 2016, doi: 10.1080/10286608.2016.1145676.

[187] E. Bernardi, S. Carlucci, C. Cornaro, et R. Bohne, « An Analysis of the Most Adopted Rating Systems for Assessing the Environmental Impact of Buildings », *Sustainability*, vol. 9, n° 7, p. 1226, juill. 2017, doi: 10.3390/su9071226.

[188] D. T. Doan, A. Ghaffarianhoseini, N. Naismith, T. Zhang, et J. Tookey, « A critical comparison of green building rating systems », *Building and Environment*, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.07.007.

[189] S. R. Chandratilake et W. P. S. Dias, « Sustainability rating systems for buildings: Comparisons and correlations », *Energy*, vol. 59, p. 22-28, sept. 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.07.026.

[190] « Densité de la population (personnes par kilomètre carré de superficie des terres) | Data ». Consulté le: 14 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://donnees.banquemondiale.org/indicator/EN.POP.DNST?view=map&year=2020

[191] *Progress on the level of water stress*. FAO and UN Water, 2021. doi: 10.4060/cb6241en.

[192] « World's Most Polluted Countries AQI Ranking 2022 ». Consulté le: 20 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.aqi.in/world-most-polluted-countries

[193] J. Mo et P. Boarin, « Designing a Pre-Assessment Tool to Support the Achievement of Green Building Certifications », *International Journal of Architectural and Environmental Engineering*, vol. 12, n° 10, p. 903-915, 2018, doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.1474783.

[194] N. Lazar et K. Chithra, « Benchmarking critical criteria for assessing sustainability of residential buildings in tropical climate », *Journal of Building Engineering*, vol. 45, p. 103467, janv. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103467.

[195] T. O. Olawumi, D. W. M. Chan, A. P. C. Chan, et J. K. W. Wong, « Development of a building sustainability assessment method (BSAM) for developing countries in sub-Saharan Africa », *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, p. 121514, août 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121514.

[196] A. O. Daoud, A. A. E. Othman, O. J. Ebohon, et A. Bayyati, « Overcoming the limitations of the green pyramid rating system in the Egyptian construction industry: a critical analysis », *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 18, n° 2, p. 114-127, mars 2022, doi: 10.1080/17452007.2020.1802218.

[197] A. Ferreira, M. D. Pinheiro, J. de Brito, et R. Mateus, « A critical analysis of LEED, BREEAM and DGNB as sustainability assessment methods for retail buildings », *Journal of Building Engineering*, vol. 66, p. 105825, mai 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.105825.

[198] L. Liang *et al.*, « Rectify the performance of Green Building Rating Tool (GBRT) in sustainability: Evidence from ISO 21929-1 », *Journal of Cleaner Production*, vol. 278, p. 123378, janv. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123378.

[199] A. Haapio et P. Viitaniemi, « A critical review of building environmental assessment tools », *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 28, n° 7, p. 469-482, oct. 2008, doi: 10.1016/j.eiar.2008.01.002.

[200] T. O. Olawumi et D. W. M. Chan, « Application of generalized Choquet fuzzy integral method in the sustainability rating of green buildings based on the BSAM scheme », *Sustainable Cities and Society*, vol. 61, n° December 2019, p. 102147, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102147.

[201] S. Bansal, S. Biswas, et S. K. Singh, « Holistic assessment of existing buildings: Indian context », *Journal of Building Engineering*, vol. 25, n° May, p. 100793, 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100793.

[202] M. F. A. Al-Jebouri, M. S. Saleh, S. N. Raman, R. A. A. B. O. K. Rahmat, et A. K. Shaaban, « Toward a national sustainable building assessment system in Oman: Assessment categories and their performance indicators », *Sustainable Cities and Society*, vol. 31, p. 122-135, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.02.014.

[203] H. Meiboudi, A. Lahijanian, S. M. Shobeiri, S. A. Jozi, et R. Azizinezhad, « Development of a new rating system for existing green schools in Iran », *Journal of Cleaner Production*, vol. 188, p. 136-143, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.283.

[204] S. Y. Janjua, P. K. Sarker, et W. K. Biswas, « Development of triple bottom line indicators for life cycle sustainability assessment of residential bulidings », *Journal of Environmental Management*, vol. 264, p. 110476, juin 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110476.

[205] « Quality Assurance Guide for Green Building Rating Tools », World Green Building Council. Consulté le: 9 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://worldgbc.org/article/quality-assurance-guide-for-green-building-rating-tools/

[206] B. Wen *et al.*, « Evolution of sustainability in global green building rating tools », *Journal of Cleaner Production*, vol. 259, p. 120912, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120912.

[207] M. Nilashi *et al.*, « A knowledge-based expert system for assessing the performance level of green buildings », *Knowledge-Based Systems*, vol. 86, p. 194-209, 2015, doi: 10.1016/j.knosys.2015.06.009.

[208] J. Andrade, L. Bragança, et J. Andrade, « Sustainability assessment of dwellings – a comparison of methodologies », *Civil Engineering and Environmental Systems ISSN:*, vol. 6608, n° March, p. 0-22, 2016, doi: 10.1080/10286608.2016.1145676.

[209] O. Awadh, « Sustainability and green building rating systems : LEED , BREEAM , GSAS and Estidama critical analysis », *Journal of Building Engineering*, vol. 11, n° August 2016, p. 25-29, 2017, doi: 10.1016/j.jobe.2017.03.010.

[210] J. Al-qawasmi et J. Al-qawasmi, « Examining indicators coverage in a sample of sustainable building assessment systems assessment systems », *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 0, n° 0, p. 1-20, 2018, doi: 10.1080/17452007.2018.1532873.

[211] A. M. Nii, A. Emmanuel, et A. Joshua, « Developing a Building Energy Efficiency Assessment Tool for Office Buildings in Ghana: Delphic Consultation Approach », *Energy Procedia*, vol. 111, n° September 2016, p. 629-638, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.225.

[212] T. O. Olawumi, D. W. M. Chan, A. P. C. Chan, et J. K. W. Wong, « Development of a building sustainability assessment method (BSAM) for developing countries in sub-Saharan Africa », *Journal of Cleaner Production*, p. 121514, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121514.

[213] N. Lazar et K. Chithra, « A comprehensive literature review on development of Building Sustainability Assessment Systems », *Journal of Building Engineering*, vol. 32, n° May, p. 101450, 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101450.

[214] J. Hugé et N. Mukherjee, « The nominal group technique in ecology & conservation: Application and challenges », *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 9, n° 1, p. 33-41, 2018, doi: 10.1111/2041-210X.12831.

[215] S. Lloyd, « Applying the nominal group technique to specify the domain of a construct », *Qualitative Market Research*, vol. 14, n° 1, p. 105-121, 2011, doi: 10.1108/13522751111099346.

[216] 14:00-17:00, « ISO 21929-1:2011: Sustainability in building construction — Sustainability indicators — Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings ». Consulté le: 27 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.iso.org/standard/46599.html

[217] E. Mulliner, N. Malys, et V. Maliene, « Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability », *Omega*, vol. 59, p. 146-156, mars 2016, doi: 10.1016/j.omega.2015.05.013.

[218] S. M. Khoshnava, R. Rostami, A. Valipour, M. Ismail, et A. R. Rahmat, « Rank of green building material criteria based on the three pillars of sustainability using the hybrid multi criteria decision making method », *Journal of Cleaner Production*, vol. 173, p. 82-99, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.066.

[219] H. Abdul-Rahman, C. Wang, L. C. Wood, et M. Ebrahimi, « Integrating and ranking sustainability criteria for housing », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, vol. 169, n° 1, p. 3-30, févr. 2016, doi: 10.1680/ensu.15.00008.

[220] G. Miller, « The development of indicators for sustainable tourism: Results of a Delphi survey of tourism researchers », *Tourism Management*, vol. 22, n° 4, p. 351-362, 2001, doi: 10.1016/S0261-5177(00)00067-4.

[221] N. Mukherjee *et al.*, « The Delphi technique in ecology and biological conservation: applications and guidelines », *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 6, n° 9, p. 1097-1109, 2015, doi: https://doi.org/10.1111/2041-210X.12387.

[222] H. A. von der Gracht, « Consensus measurement in Delphi studies. Review and implications for future quality assurance », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 79, n° 8, p. 1525-1536, 2012, doi: 10.1016/j.techfore.2012.04.013.

[223] N. A. Aldossary, Y. Rezgui, et A. Kwan, « Consensus-based low carbon domestic design framework for sustainable homes », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, p. 417-432, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.05.070.

[224] G. Akhanova, A. Nadeem, J. R. Kim, et S. Azhar, « A multi-criteria decision-making framework for building sustainability assessment in Kazakhstan », *Sustainable Cities and Society*, vol. 52, p. 101842, janv. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101842.

[225] R. Grover, S. Emmitt, et A. Copping, « Trends in sustainable architectural design in the United Kingdom: A Delphi study », *Sustainable Development*, vol. 28, n° 4, p. 880-896, 2020, doi: 10.1002/sd.2043.

[226] M. K. Rayens et E. J. Hahn, « Building Consensus Using the Policy Delphi Method », *Policy, Politics, & Nursing Practice*, vol. 1, n° 4, p. 308-315, nov. 2000, doi: 10.1177/152715440000100409.

[227] J. M. English et G. L. Kernan, « The prediction of air travel and aircraft technology to the year 2000 using the Delphi method », *Transportation Research*, vol. 10, n° 1, p. 1-8, févr. 1976, doi: 10.1016/0041-1647(76)90094-0.

[228] T. O. Olawumi et D. W. M. Chan, « Critical success factors for implementing building information modeling and sustainability practices in construction projects: A Delphi survey », *Sustainable Development*, vol. 27, n° 4, p. 587-602, 2019, doi: 10.1002/sd.1925.

[229] R. D. Brown et N. M. Hauenstein, « Interrater agreement reconsidered: An alternative to the rwg indices », *Organizational research methods*, vol. 8, n° 2, p. 165-184, 2005, doi: https://doi.org/10.1177/1094428105275376.

[230] T. A. O'Neill, « An overview of interrater agreement on likert scales for researchers and practitioners », *Frontiers in Psychology*, vol. 8, n° MAY, 2017, doi: 10.3389/fpsyg.2017.00777.

[231] J. M. LeBreton et J. L. Senter, « Answers to 20 questions about interrater reliability and interrater agreement », *Organizational Research Methods*, vol. 11, n° 4, p. 815-852, 2008, doi: 10.1177/1094428106296642.

[232] C. Jiménez-Pulido, A. Jiménez-Rivero, et J. García-Navarro, « Sustainable management of the building stock: A Delphi study as a decision-support tool for improved inspections », *Sustainable Cities and Society*, vol. 61, n° April, p. 102184, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102184.

[233] R. Nair, R. Aggarwal, et D. Khanna, « Methods of Formal Consensus in Classification/Diagnostic Criteria and Guideline Development », *Seminars in Arthritis and Rheumatism*, vol. 41, n° 2, p. 95-105, 2011, doi: 10.1016/j.semarthrit.2010.12.001.

[234] W. Ullah, S. Noor, et A. Tariq, « The development of a basic framework for the sustainability of residential buildings in Pakistan », *Sustainable Cities and Society*, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.009.

[235] R. C. Schmidt, « Managing Delphi surveys using nonparametric statistical techniques », *Decision Sciences*, vol. 28, n° 3, p. 763-774, 1997, doi: 10.1111/j.1540-5915.1997.tb01330.x.

[236] N. Gisev, J. S. Bell, et T. F. Chen, « Interrater agreement and interrater reliability: Key concepts, approaches, and applications », *Research in Social and Administrative Pharmacy*, vol. 9, n° 3, p. 330-338, 2013, doi: 10.1016/j.sapharm.2012.04.004.

[237] J. Patzlaff, M. Aurélio, S. González, et A. P. Kern, « The assessment of building sustainability in micro and small building firms – Case study on southern Brazil », *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, vol. 29, p. 151-158, 2014.

[238] F. Karaca, M. Guney, A. Kumisbek, D. Kaskina, et S. Tokbolat, « A new stakeholder opinion-based rapid sustainability assessment method (RSAM) for existing residential buildings », *Sustainable Cities and Society*, vol. 60, n° March, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102155.

[239] E. Zarghami, H. Azemati, D. Fatourehchi, et M. Karamloo, « Customizing well-known sustainability assessment tools for Iranian residential buildings using Fuzzy Analytic Hierarchy Process », *Building and Environment*, vol. 128, n° August 2017, p. 107-128, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.032.

[240] M. F. A. Al-jebouri, A. K. Shaaban, S. N. Raman, R. Atiq, et A. Bin, « Framework of Environmental Rating System for Home Buildings in Oman », *Journal of Architectural Engineering*, p. 1-9, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000241.

[241] H. Abdul-rahman, C. Wang, L. C. Wood, et M. Ebrahimi, « Integrating and ranking sustainability criteria for housing », *Engineering Sustainability*, n° Mcdm, p. 1-28, 2015.

[242] H. Alwaer et D. J. Clements-croome, « Key performance indicators (KPIs) and priority setting in using the multi-attribute approach for assessing sustainable intelligent buildings », *Building and Environment*, vol. 45, n° 4, p. 799-807, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.019.

[243] R. Mateus et L. Bragança, « Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBToolPT-H », *Building and Environment*, vol. 46, n° 10, p. 1962-1971, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.04.023.

[244] D. Kibira, M. P. Brundage, S. Feng, et K. C. Morris, « Procedure for Selecting Key Performance Indicators for Sustainable Manufacturing », *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 140, n° 1, 2018, doi: 10.1115/1.4037439.

[245] L. Tupenaite, A. Kaklauskas, I. Lill, L. Kanapeckiene, et L. Kauskale, « Sustainability Assessment of the New Residential Projects in the Baltic States : A Multiple Criteria Approach », *Sustainability*, 2018, doi: 10.3390/su10051387.

[246] S. Y. Janjua, P. K. Sarker, et W. K. Biswas, « Development of triple bottom line indicators for life cycle sustainability assessment of residential bulidings », *Journal of Environmental Management*, vol. 264, n° March, p. 110476, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110476.

[247] N. Lazar et K. Chithra, « Benchmarking critical criteria for assessing sustainability of residential buildings in tropical climate », *Journal of Building Engineering*, vol. 45, n° October 2021, p. 103467, 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103467.

[248] A. Francis et A. Thomas, « A framework for dynamic life cycle sustainability assessment and policy analysis of built environment through a system dynamics approach », *Sustainable Cities and Society*, vol. 76, p. 103521, janv. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2021.103521.

[249] Y. Decorte, M. Steeman, et N. Van Den Bossche, « Effect of a one-dimensional approach in LCA on the environmental life cycle impact of buildings: Multi-family case study in Flanders », *Building and Environment*, vol. 206, p. 108381, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108381.

[250] F. Cerdas, *Integrated Computational Life Cycle Engineering for Traction Batteries*. Springer, 2022.

[251] M. Gangolells, M. Casals, S. Gassó, N. Forcada, X. Roca, et A. Fuertes, « A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the construction process of residential buildings », *Building and Environment*, vol. 44, n° 3, p. 558-571, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.05.001.

[252] G. K. C. Ding et L. Y. Shen, « Assessing sustainability performance of built projects: A building process approach », *International Journal of Sustainable Development*, vol. 13, n° 3, p. 267-279, 2010, doi: 10.1504/IJSD.2010.037558.

[253] S. R. Chandratilake et W. P. S. Dias, « Ratio based indicators and continuous score functions for better assessment of building sustainability », *Energy*, vol. 83, p. 137-143, avr. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.02.007.

[254] S. Kachkouch, F. Ait-Nouh, B. Benhamou, et K. Limam, « Experimental assessment of thermal performance of three passive cooling techniques for roofs in a semi-arid climate », *Energy and Buildings*, vol. 164, p. 153-164, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.008.

[255] S. Hamdaoui, M. Mahdaoui, A. Allouhi, R. El Alaiji, T. Kousksou, et A. El Bouardi, « Energy demand and environmental impact of various construction scenarios of an office building in Morocco », *Journal of Cleaner Production*, vol. 188, p. 113-124, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.298.

[256] « Standard 189.1-2020, Standard for the Design of High-Performance Green Buildings ». Consulté le: 22 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_189.1_2020

[257] Deutsche Gesellschaft fur, « Guide construction durable-Maroc », 2020.

[258] T. L. Saaty, *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process*. RWS publications, 1994.

[259] T. L. Saaty, « Decision making with the analytic hierarchy process », *International journal of services sciences*, vol. 1, n° 1, p. 83-98, 2008, doi: https://dx.doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590.

[260] H. M. Moshkovich, L. F. A. M. Gomes, A. I. Mechitov, et L. A. D. Rangel, « Influence of models and scales on the ranking of multiattribute alternatives », *Pesquisa Operacional*, vol. 32, p. 523-542, 2012, doi: https://doi.org/10.1590/S0101-74382012005000022.

[261] « Nolberto Munier », ResearchGate. Consulté le: 7 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/profile/Nolberto-Munier

[262] H.-H. Wu et Y.-N. Tsai, « An integrated approach of AHP and DEMATEL methods in evaluating the criteria of auto spare parts industry », *International Journal of Systems Science*, vol. 43, n° 11, p. 2114-2124, nov. 2012, doi: 10.1080/00207721.2011.564674.

[263] R. Kumanayake et H. Luo, « Development of an automated tool for buildings' sustainability assessment in early design stage », *Procedia engineering*, vol. 196, p. 903-910, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.023.

[264] J. Aczél et T. L. Saaty, « Procedures for synthesizing ratio judgements », *Journal of mathematical Psychology*, vol. 27, n° 1, p. 93-102, 1983, doi: https://doi.org/10.1016/0022-2496(83)90028-7.

[265] S. Pant, A. Kumar, M. Ram, Y. Klochkov, et H. K. Sharma, « Consistency indices in analytic hierarchy process: a review », *Mathematics*, vol. 10, n° 8, p. 1206, 2022, doi: https://doi.org/10.3390/math10081206.

[266] « Analytic Hierarchy Process – BPMSG ». Consulté le: 22 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://bpmsg.com/tag/analytic-hierarchy-process/

[267] M. J. Webb, « Estimating Uncertainty Attributable to Inconsistent Pairwise Comparisons in the Analytic Hierarchy Process (AHP) », George Washington University. Consulté le: 7 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.proquest.com/openview/59c2f3bc487202c51560cd4c1ad6d2b9/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750

[268] S. Ouhaibi, A. Gounni, N. Belouaggadia, Mohammed. Ezzine, et R. Lbibb, « Energy, environmental and economic performance of an external roof for a sustainable building », *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, p. 1-17, juill. 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1796847.

[269] A.-E. Barkaoui, Y. Zarhloule, P. S. Varbanov, et J. J. Klemes, « Geothermal power potential assessment in north eastern morocco », *Chemical Engineering Transactions*, vol. 61, p. 1627-1632, 2017, doi: https://doi.org/10.3303/CET1761269.

[270] T. Barradi, « Un Aperçu de la Situation de L'Efficacité Energétique des Ménages au Maroc », 2019. Consulté le: 6 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://ma.boell.org/fr/2020/06/02/un-apercu-de-la-situation-de-lefficacite-energetique-des-menages-au-maroc

[271] N. Fathi, L. Bounoua, et M. Messouli, « A Satellite Assessment of the Urban Heat Island in Morocco », *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 45, n° 1, p. 26-41, janv. 2019, doi: 10.1080/07038992.2019.1601007.

[272] ko Mohamed, « Déchets de construction-les maillons de l'économie circulaire ». Consulté le: 22 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.cfcim.org/wp-content/uploads/2018/12/Dechets-de-construction.pdf

[273] C. durable le média social du bâtiment et de la ville, « Consulter les initiatives », construction21.org. Consulté le: 2 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.construction21.org/maroc/case-studies/.

[274] 14:00-17:00, « ISO 21931-1:2010 : Sustainability in building construction — Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works — Part 1: Buildings ». 10 août 2010. Consulté le: 27 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.iso.org/standard/45559.html

[275] « BREEAM International New Construction-Version 6 ». Consulté le: 28 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://files.bregroup.com/breeam/technicalmanuals/sd/international-new-construction-version-6/

[276] A. El Machi, S. Mabroum, Y. Taha, A. Tagnit-Hamou, M. Benzaazoua, et R. Hakkou, « Use of flint from phosphate mine waste rocks as an alternative aggregates for concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 271, p. 121886, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121886.

[277] L. Boukhattem, M. Boumhaout, H. Hamdi, B. Benhamou, et F. Ait Nouh, « Moisture content influence on the thermal conductivity of insulating building materials made from date palm fibers mesh », *Construction and Building Materials*, vol. 148, p. 811-823, sept. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.020.

[278] M. Lamrani, M. Mansour, N. Laaroussi, et M. Khalfaoui, « Thermal study of clay bricks reinforced by three ecological materials in south of morocco », *Energy Procedia*, vol. 156, p. 273-277, janv. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.141.

[279] M. Charai, A. Mezrhab, L. Moga, et M. Karkri, « Hygrothermal, mechanical and durability assessment of vegetable concrete mixes made with Alfa fibers for structural and thermal insulating applications », *Construction and Building Materials*, vol. 335, p. 127518, juin 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127518.

[280] C. durable le média social du bâtiment et de la ville, « Les initiatives-Etude de cas », construction21.org. Consulté le: 30 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.construction21.org/maroc/case-studies/.

[281] L. Tupenaite, I. Lill, I. Geipele, et J. Naimaviciene, « Ranking of Sustainability Indicators for Assessment of the New Housing Development Projects: Case of the Baltic States », *Resources*, vol. 6, n° 4, p. 55, oct. 2017, doi: 10.3390/resources6040055.

[282] E. Zarghami, D. Fatourehchi, et M. Karamloo, « Establishing a region-based rating system for multi-family residential buildings in Iran : A holistic approach to sustainability », *Sustainable Cities and Society*, vol. 50, n° November 2018, p. 101631, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101631.

[283] « Evaluation du projet via le CBS+ (Coefficient de potentiel de biodiversité par surface) | Guide Bâtiment Durable ». Consulté le: 5 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.guidebatimentdurable.brussels/favoriser-biodiversite/evaluation-projet-via-cbs-coefficient-potentiel-biodiversite-surface

[284] *Standard 189.1-2020, Standard for the Design of High-Performance Green Buildings*. Consulté le: 28 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_189.1_2020

[285] « La filière solaire au Maroc ». Consulté le: 8 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.fellah-trade.com/fr/developpement-durable/energies-renouvelables-maroc/solaire

[286] « La Valorisation Energétique de la Biomasse à l'horizon 2030 ». Consulté le: 8 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.mem.gov.ma/Pages/actualite.aspx?act=279

[287] « Biobric - thermo'bric G7 ». Consulté le: 12 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.biobric.com/briques-de-mur/briques-de-20-traditionnelles/g757-thermobric-g7

[288] « INIES | Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment ». Consulté le: 12 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/infos-produit

[289] F. El Khazanti *et al.*, « Assessment of a Mining-Waste Dump of Galena Mine in the East of Morocco for Possible Use in Civil Engineering », *Journal of Ecological Engineering*, vol. 23, n° 4, p. 336-349, 2022, doi: 10.12911/22998993/146585.

Thèses internationales en relation avec le sujet

- Olawumi, T (2020), Development of a BIM-enabled and cloud-based sustainability assessment system for buildings in sub Saharan Africa: the case of Nigeria (Thèse de doctorat, Hong Kong Polytechnic), disponible sur: https://theses.lib.polyu.edu.hk/handle/200/10715.
- Huo, X (2018), A framework for effective site planning and design of green residential buildings in China, (Thèse de doctorat, Hong Kong Polytechnic), disponible sur: https://theses.lib.polyu.edu.hk/handle/200/9768.
- Nura, M (2018), Constraints and Opportunities in the Application of Green Building Principles in the Professional Building Practice in Addis Ababa, (Thèse de doctorat, l'université d'Addis Abeba, Éthiopie), disponible sur: http://etd.aau.edu.et/handle/123456789/17782.
- Aussama, K (2018), Developing a strategy for the implementation of sustainable construction practices in Libya (Thèse de doctorat, l'université de Salford Royaume-Uni), disponible sur:

https://salford-repository.worktribe.com/output/1378908/developing-a-strategy-for-the-implementation-of-sustainable-construction-practices-in-libya.
- Raed, A (2017), A framework for the sustainability assessment of urban design and development in Iraqi cities (Thèse de doctorat, l'université Cardiif, Royaume-Uni), disponible sur : https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/105529/.

ANNEXES

Annexe A : Caractérisation de la contribution scientifique des pays/territoires de la région MENA**Erreur ! Signet non défini.**

Annexe B : Top 10 des revues classées selon la force totale des liens dans la région MENA**Erreur ! Signet non défini.**

Annexe C : Cinq articles plus fréquemment cités dans la recherche « bâtiment vert » dans la région MENA ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe D : Normes internationales (ISO) pour la durabilité des bâtiments ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe E: Variation de la température extérieure de six zones climatiques du Maroc **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe F: Liste des formations universitaires proposant des modules liés au bâtiment vert**Erreur ! Signet non défini.**

Annexe G: Exemples des bâtiments verts certifiés au Maroc ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe H: Liens des questionnaires appliqués dans la thèse ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe I : Classement les obstacles à l'adoption des GB par les groupes professionnels**Erreur ! Signet non défini.**

Annexe J: Classement les moteurs à l'adoption des GB par les groupes professionnels**Erreur ! Signet non défini.**

Annexe K : Détails sur les neuf systèmes de certification des bâtiments verts ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe L : Liste des organisations nationales contactées pour participer au questionnaire de Delphi ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe M : Lettre d'invitation (questionnaire A) ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe N: Consensus et la stabilité des deux tours de la méthode Delphi ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe O : Classement des catégories de durabilité pendant le deuxième tour de Delphi**Erreur ! Signet non défini.**

Annexe P: Liste des critères d'évaluation du pilier environnement du système BuSAF **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe Q: Fiches descriptives d'évaluation de la durabilité environnementale des bâtiments résidentiels (BuSAF(Env) ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe R : Questionnaire de la pondération des catégories environnementales (BuSAF(Env)) **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe S : Sources des données et méthodes de collecte par rapport aux critères d'évaluation**Erreur ! Signet non défini.**

Annexe T : Évaluation détaillée des deux bâtiments selon le référentiel BuSAF(Env) ... **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe U : Détails de la multi-évaluation de la performance environnementale des deux études de cas. **Erreur ! Signet non défini.**