



APPROCHE MULTICRITÈRE D'AIDE AU CHOIX DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION DES BÂTIMENTS

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC
GRADE DE MASTER**

SPECIALITE : GENIE CIVIL/BATIMENTS

Présenté et soutenu publiquement le 30 Septembre 2020 par :

**DESSU MKOUNGA Stella Sandra
(N° 20160413)**

Travaux dirigés par :

M. Arnaud OUEDRAOGO, Assistant d'enseignement à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie) au Burkina Faso

M. Clovie NOUMSI DJEMO Ingénieur Génie civil et Directeur Général de l'entreprise DJEMO BTP. BP 8412, Email : ndcperso@yahoo.fr

Entreprise : DJEMO BTP

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Décroly DJOUBISSIE

Examineurs : Dr Césaire HEMA
Mr Christian RAMADJI

Promotion 2019/2020

DEDICACES

*Je rends grâce à L'ETERNEL **DIEU** Tout Puissant qui a toujours été avec moi dans l'accomplissement de ce travail. Que son nom soit loué à jamais ! et je dédie ce travail particulièrement :*

*A la mémoire de mon feu papa **MKOUNGA Romuald**, que son âme repose en paix !*

*A ma maman **TOUOCHIE LOUISE** épouse **MKOUNGA** pour son amour, ses sacrifices et son soutien inconditionnel, tout au long de ma formation à l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).*

A mes sœurs ainsi qu'à ma fille.



CITATION

« Seuls ceux qui sont prêts à prendre le risque d'une terrible défaite rencontreront une formidable victoire. »

Robert Kennedy

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier l'Eternel, le **DIEU** Tout Puissant qui m'a gardé et accordé santé, courage et force durant toute ma formation.

Mes sincères remerciements vont ensuite à l'endroit de :

➤ Monsieur Clovie **NOUMSI DJEMO, Directeur Général de DJEMO BTP** pour m'avoir permise d'effectuer mon stage au sein de son entreprise, pour sa grande disponibilité et pour son encadrement tout au long de mon stage ;

➤ Monsieur **Aimé Césaire TCHOUNGANG, Ingénieur de conception a DJEMO BTP** et Monsieur **Arnaud OUEDRAOGO, Assistant d'enseignement à 2iE**, pour leur apport dans l'amélioration scientifique, et la revue de la présentation de ce document ;

➤ Monsieur **Jules TAKAM, Conducteur des travaux** pour son encadrement durant ma période de stage au chantier.

➤ Tout le **personnel de DJEMO BTP** pour l'accueil chaleureux au sein de l'entreprise ;

➤ Tous les **enseignants du Département de Génie Civil et hydraulique** et en particulier le **Docteur LAWANE**, Chef de département de Génie Civil pour tout ce qu'il fait pour la formation des étudiants et le bon fonctionnement du département ;

➤ Mr **Boris DEFFO**, pour son soutien et ses conseils ;

➤ Mes **camarades de promotion** et en particulier ceux du génie civil pour l'ambiance conviviale et fraternelle vécu durant notre séjour à 2iE ;

➤ Toute **ma grande famille**, pour le soutien et l'estime qu'elle a pour moi ;

Je tiens également à remercier tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu et assisté tout au long de ma formation.

Encore,  **MERCI** !!!

RESUME

Avant d'entreprendre l'édification d'un bâtiment, il est primordial de choisir les matériaux les mieux adaptés à la situation. C'est dans ce sens que notre travail portant sur l'approche multicritère d'aide au choix des matériaux de construction des bâtiments s'est donné pour mission d'apporter un élément de solution pour le choix des matériaux à mettre en œuvre lors des constructions des bâtiments. Ce choix doit se faire de façon à réaliser le meilleur compromis entre le coût, les performances mécaniques, environnementales et sociales.

Les résultats d'études techniques et les cibles de la démarche Haute Qualité Environnementale associés aux typologies des constructions observées ont permis de retenir les principaux critères qui influent le choix. La nécessité d'une méthode de choix multicritère s'est donc posée et à l'aide de l'arbre de décision, nous avons adopté la méthode d'agrégation partielle ELECTRE III, basée sur la pondération des critères à seuils donc le résultat est le rangement des alternatives.

L'outil d'aide à la décision (utilitaire **MATLAB-EXCEL**) établi produit le résultat par la méthodologie suivante : remplissage du tableau de performances contenu dans le fichier « *performances.xls* », et après exécution du fichier « *MATLAB_EXCEL_ELECTREIII.m* » récupération des résultats dans les fichiers « *result_Ascend.xls* » pour la distillation ascendante et « *result_Descend.xls* » pour la distillation descendante. Le rangement final des alternatives est la combinaison des deux distillations. Enfin une application de notre outil au composant mur d'un bâtiment à usage hôtelier nous a conduits, après définition de l'unité fonctionnelle et de la durée de vie typique au rangement des alternatives.

Mots clés : matériaux de construction, critères, aide à la décision, choix multicritère, ELECTRE III.



ABSTRAT

Before undertaking the construction of a building, it is essential to choose the materials best suited to the situation. It is in this sense that our work on the design of load-bearing structures of buildings is given the mission to provide an element of solution for the choice of materials to be used in the construction of buildings. This choice must be made in such a way as to achieve the best compromise between cost, mechanical, environmental and social performance.

The main criteria retained influencing the choice of materials allowed us to opt for the multi-criteria choice method and with the help of the decision tree, we adopted the ELECTRE III partial aggregation method, based on the weighting of threshold criteria, so the result is the ranking of alternatives.

The established decision support tool (MATLAB-EXCEL utility) produces the result using the following methodology: filling in the performance table contained in the "performances.xls" file, and after executing the " *MATLAB_EXCEL_ELECTREIII.m* " file recovering the results in the "result_Ascend.xls" file for the ascending distillation and "result_Descend.xls" file for the descending distillation. The final arrangement of the alternatives is the combination of the two distillations. Finally, an application of our tool to the wall component of a hotel building led us, after defining the functional unit and the typical life span, to the storage of the alternatives.

Key words: building materials, criteria, decision support, multi-criteria choice, ELECTRE III.



ABREVIATIONS

ANOR :	Agence des Normes et de qualité
BA :	Béton Armé
BC :	Briques cuites
BECP :	Bureau d'Etude de Contrôle et de Planification
BTC :	Blocs de Terre Comprimée
BTP :	Bâtiment et Travaux Publics
BTS :	Blocs de Terre Stabilisée
CSTB :	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DSCE :	Document de Stratégies pour la Croissance et l'Emploi
DVT :	Durée de Vie Typique
ELECTRE :	ELimination et Choix Traduisant le Réalité
ERP :	Etablissement Recevant du Public
FDES :	Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire
HIMO :	Haute intensité de main d'œuvre
HQE :	Haute Qualité Environnementale
IGH :	Immeuble a Grande Hauteur
INIES :	Information sur l'impact Environnemental et Sanitaire
PERT:	Program Evaluation and Review Technic
PROMETHEE:	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
UF :	Unité Fonctionnelle

SOMMAIRE

DEDICACES	i
CITATION.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
ABSTRAT	v
ABREVIATIONS.....	vi
SOMMAIRE.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
INTRODUCTION.....	12
CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE.....	14
I. Présentation de la structure d'accueil.....	14
I.1. Historique de DJEMO BTP SARL.....	14
I.2. Identification de l'entreprise.....	15
I.3. Secteurs d'activités, intervenants et les réalisations.....	15
I.3.1. Secteurs d'activités.....	15
I.3.2. Un personnel hautement qualifié.....	15
I.3.3. Une logistique de pointe.....	15
II. Contexte de l'étude.....	16
III. Objectif général et spécifique.....	16
III.1. Objectif général.....	16
III.2. Objectifs spécifiques.....	16
CHAPITRE II : TYPOLOGIES DE L'UTILISATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTIONS.....	17
Introduction.....	17
I. Les typologies d'utilisation des matériaux de constructions.....	17
I.1. Famille de constructions en béton.....	17
I.2. Famille des constructions en terre.....	19
I.3. Famille des constructions en bois.....	22



II. Propriétés des matériaux de construction	24
III. Les matériaux associés aux constructions	26
III.1. Matériaux de fondations.....	26
III.2. Les matériaux d'élévations.....	27
III.2.1. Matériaux de structure	27
III.2.2. Matériaux de remplissage.....	27
III.2.3. Matériaux de charpente.....	28
III.2.4. Matériaux de couverture	28
CHAPITRE III : CRITERES D'EVALUATION DES MATERIAUX ET APPORT DE L'ANALYSE MULTICRITERE	29
I. Examen des critères d'évaluation	29
I.1. Coût	29
I.2. Résistance.....	30
I.3. Confort	30
I.4. Esthétique.....	31
I.5. Disponibilité	32
I.6. Impact environnemental.....	32
I.7. Impact social	33
I.8. Conformité (existence d'une norme, conformité à la norme)	33
II. Pondération des critères	34
III. Problème d'aide au choix (non commensurabilité des critères)	35
IV. Apport de l'analyse multicritère	36
IV.1. Actions et acteurs de la décision	36
IV.2. Conséquences d'une action	37
IV.3. Critères.....	38
IV.4. Problématiques de références	39
V. Méthodes, outils existants et choix de l'outil d'aide au choix	42
V.1. Les méthodes d'agrégation complète transitive	42
V.2. Les méthodes d'agrégation partielle.....	42
V.3. Choix de la méthode.....	43
VI. Description et mise sur pieds de l'outil d'aide (Utilitaire ELECTREIII)	43
VI.1. Généralités	43
VI.2. Description de l'outil et principe de fonctionnement.....	47
CHAPITRE IV : APPLICATION ET RESULTAT	49
I. Application au projet de construction d'un hôtel	49



I.1. Origine du projet	49
I.2. Description du site	49
I.3. Évaluation à l'aide de l'outil	49
I.4. Résultats et commentaires	52
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	56
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	57
ANNEXES	1



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Normation du critère esthétique	32
Tableau 2 : Identification des types de problématique	41
Tableau 3 : Description des alternatives	50
Tableau 4 : Évaluation du coût de construction du composant "mur"	51
Tableau 5 : Évaluation en impact social.....	52
Tableau 6 : Tableau de performances des alternatives du composant "mur"	55
Tableau 7 : Matrice de décision.....	52



LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Constructions en agglomérés de béton	17
Figure 2 : Constructions en mur de COFFOR.....	18
Figure 3 : Briques cuites.....	19
Figure 4 : Constructions en Adobe.....	20
Figure 5 : Constructions en BTS.....	21
Figure 6 : Constructions en pisé.....	21
Figure 7 : Constructions en calabotes.....	22
Figure 8 : Les Rondins.....	23
Figure 9 : les huttes.....	24
Figure 10 : Problématique du choix ($P\alpha$)	40
Figure 11 : Problématique du tri ($P\beta$)	40
Figure 12 : Problématique du rangement ($P\gamma$)	40
Figure 13 : Problématique de description ($P\delta$)	41
Figure 14 : Détermination de l'indice de concordance.....	44
Figure 15 : Détermination de l'indice de discordance	45
Figure 16 : Graphe de surclassement.....	54

INTRODUCTION

L'essor économique et social d'une métropole passe par le développement des infrastructures phares à son évolution à savoir le réseau routier, l'accès à l'eau, l'accès à l'électricité, l'accès au logement, les infrastructures d'habitations, etc.

C'est dans cette optique que, le Cameroun s'est engagé dans un ambitieux programme en vue de l'émergence économique à l'horizon 2035 fixé par la DSCE qui se traduit par plusieurs points parmi lequel le relèvement des infrastructures. Cet objectif ne peut être atteint que par le dynamisme de secteurs clés du développement notamment celui des BTP. C'est ainsi que l'entreprise DJEMO BTP dans l'exercice de ses activités, est confrontée quotidiennement à un challenge celui de réaliser des bâtiments de plus en plus haut et plus grand raison pour laquelle elle a été choisi pour la construction d'un bâtiment à usage hôtelier dans la ville de Yaoundé capitale politique du Cameroun.

Ayant conscience que les matériaux de construction constituent la principale matière utilisée dans les secteurs de la construction comme les Bâtiments et Travaux Publics (BTP), la gamme des matériaux utilisés est donc relativement vaste. En fonction des besoins, les acteurs de ce secteur doivent effectuer un choix judicieux dans ladite gamme. L'un des problèmes faisant apparition en surface est le choix des matériaux de construction, choix qui est fonction d'un nombre important de paramètres parmi lesquels les critères de choix, vu la multiplicité et parfois la non commensurabilité de ceux-ci. Il est donc important de s'y prendre avec beaucoup de précautions et de méthodes.

L'objectif de ce travail est de mettre à la disposition des intervenants des projets de construction un outil méthodique efficace d'aide au choix multicritère des matériaux de construction des bâtiments.

Afin de mener à bien notre étude dont le thème est « **Approche multicritère d'aide au choix des matériaux de constructions des bâtiments** », notre travail sera subdivisé en quatre chapitres :

- Un **premier chapitre** qui présente de façon générale notre étude en passant par la présentation de la structure d'accueil, le contexte de l'étude et l'objectif de notre travail.
- Dans le **second chapitre**, la typologie des constructions de bâtiment est présentée dans le but de faire ressortir les différents matériaux existants et les phases de la construction concernées ;
- Suite à cela, la nécessité se pose sur le choix des matériaux de constructions. Après



avoir établi les critères qui influencent ce choix, nous allons présenter l'apport général de l'analyse multicritère pour notre étude, présenter les différentes méthodes existantes de résolution des problèmes multicritères, décrire et modéliser l'outil objet de la présente étude. Ceci est fait par le **troisième chapitre** ;

- Enfin, le **quatrième chapitre** se chargera de faire une application de notre outil au choix des matériaux du composant « mur » du bâtiment de l'hôtel.



CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE

I. Présentation de la structure d'accueil

Il sera question de présenter la structure dans laquelle s'est effectué notre travail. Pour y parvenir, nous présenterons d'une part le cadre professionnel dans lequel notre travail a évolué et d'autre part les technologies auxquelles nous nous sommes frottés.

I.1. Historique de DJEMO BTP SARL

L'entreprise DJEMO B.T.P Sarl est aujourd'hui une grande entreprise connue pour ses multiples réalisations et fait partie des meilleures entreprises dans le domaine de génie civil en Afrique Centrale et même au-delà. Les lignes suivantes retracent les grandes étapes de son histoire.

- **1991** : Création de DJEMO BTP par l'ingénieur de Génie Civil et Urbain Clovie NOUMSI DJEMO sous la dénomination EBTP (Entreprise de Bâtiment et Travaux Publics), dont le siège était à Elig-Essono Yaoundé.

- **2005** : EBTP devient DJEMO-EBTP, une société à responsabilité limitée (SARL) et le capital passe d'un à 50 millions de FCFA. L'entreprise quitte ses locaux d'Elig Essono pour s'installer dans un immeuble au centre-ville, sis à la montée Anne rouge Yaoundé.

- **2007** : Suite à la croissance continue et à la diversification de ses activités, DJEMO - EBTP quitte le centre-ville de Yaoundé et s'installe dans ses propres locaux Nkol Anga'a à Yaoundé, sur un terrain d'environ 1.2 hectares avec 300m² de bureaux, et 600 m² d'ateliers (menuiseries bois, métallique, verrerie, préfabriqué) et le sigle passe à DJEMO-BTP. Ensuite, elle crée son site web sur www.btp-djemo.com.

Le siège social actuel est sur la route de MFOU à 400 m du carrefour AWAE « escalier ». L'entreprise DJEMO BTP Sarl brille notamment par la variété de ses activités tant sur la scène nationale qu'internationale.

- **2012** : **Recapitalisation de l'entreprise.** L'entreprise augmente son capital de 50 à 400 millions de Francs CFA.

- **2014** : Refonte du système managérial de l'entreprise suivie du changement du système d'information avec en prime le changement du site web pour le nom www.djemobtp.cm et du logo de l'entreprise.

- **2019** : la création du **BCEP**



I.2. Identification de l'entreprise

Voir tableau 1 en *annexe 1*

I.3. Secteurs d'activités, intervenants et les réalisations

I.3.1. Secteurs d'activités

Les principaux secteurs d'activité de l'entreprise sont :

- La conception et l'étude des bâtiments ;
- La construction des ouvrages d'art ;
- La construction des ouvrages de second œuvre ;
- La construction des maisons économiques ;
- Les ateliers de fabrication tels que : la vitrerie, la menuiserie bois, menuiserie métallique, la ferronnerie.

I.3.2. Un personnel hautement qualifié

L'Entreprise comprend en son sein des spécialistes de plusieurs domaines :

- Ingénierie de conception ;
- Ingénierie de travaux ;
- Ressources humaines ;
- Finance ;
- Comptabilité ;
- Menuiserie ;
- Topographie.

I.3.3. Une logistique de pointe

La logistique de l'entreprise est constituée de :

- Une centrale à béton ;
- Des toupies ;
- Des grues ;
- Des montes charges ;
- Des camions bennes ;
- Une voiture de transport de personnel de chantier à douala ;
- Une pelle excavatrice ;
- Une auto-bétonnières ;
- Des bétonnières ;
- Des pompes vibrantes.



II. Contexte de l'étude

Le Cameroun encore appelé « Afrique en miniature » est un pays de l'Afrique centrale, situé entre l'équateur et les tropiques.

C'est dans la ville de Yaoundé capitale politique du Cameroun que nous avons effectué notre stage et ceci en 2 étapes :

- La première étape de notre stage s'est déroulée au lieu-dit montée Jaco où se construisait un immeuble de 2 sous-sols, un rez-de-chaussée, une mezzanine, et 12 étages.
- La seconde étape s'est faite au bureau d'étude de contrôle et de planification (BECP) situé à Etoa-meki à l'entrée du foyer Bandjoun. C'est là où se font toutes les études de l'entreprises, les notes de calcul et les plans

L'entreprise DJEMO BTP dans la recherche permanente de la satisfaction de sa clientèle afin de se hisser une place sur le marché mondial, a fait face à de nombreux challenges dans la réalisation des immeubles toujours plus grand, plus haut et plus complexe. Pour cette raison, elle souhaite optimiser sa démarche dans lors des constructions des bâtiments en produisant un document d'outil d'aide la décision sur le choix des matériaux de construction.

III. Objectif général et spécifique

III.1. Objectif général

L'objectif de ce mémoire est de produire une démarche scientifique permettant d'optimiser le choix des matériaux de construction des bâtiments à travers un outil d'aide à la décision.

III.2. Objectifs spécifiques

Faire ressortir un document d'outil d'aide à la décision qui permettra :

- De présenter les différents matériaux de constructions ;
- De faire le choix parmi ces matériaux en utilisant l'outil Matlab.

CHAPITRE II : LES TYPES D'UTILISATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTIONS

Introduction

Bien que les constructions au Cameroun se fassent le plus souvent sans étude technique en vue du choix des matériaux, l'observation faite nous amène à dire qu'il y aurait quand même une logique de répartition des typologies sur le territoire national. L'objet du présent chapitre est donc de présenter les différents types de constructions observées au Cameroun, de les décrire et de ressortir les matériaux qui y sont associés. Pour atteindre cet objectif, nous allons nous intéresser principalement aux matériaux de remplissage qui définissent dans la plupart de cas le nom des différents types.

I. Les différentes familles de constructions

I.1. Famille de constructions en béton

Les constructions en béton sont des constructions qui utilisent comme matériaux le sable, le gravier, un liant et éventuellement des adjuvants. Dans le cas où des aciers lui sont associés, on parlera de construction en « béton armé ».

I.1.1. Constructions en agglomérés de béton

Les agglomérés sont des blocs de béton creux ou non préfabriqués dans des moules en vue faire un remplissage. Lors de leur mise en œuvre, un mortier est utilisé pour assurer la solidarité entre les multiples blocs constitutifs du mur. Les constructions en agglomérés de béton son répartie sur l'ensemble du territoire Camerounais.



Figure 1 : Constructions en agglomérés de béton

Avantages :

- ❖ Typologie facilement adaptable à la construction des immeubles à grande hauteur ;

- ❖ La typologie offre une facilité du passage des gaines d'électricité et de plomberie dans les vides du mur, conservant ainsi les propriétés finales visées de celui-ci ;
- ❖ En cas d'ajout d'adjuvant, les agglos résistent à l'action de l'eau (eau de pluie, de remontée capillaire,) et n'est pas sensible à l'humidité ;
- ❖ Isolation sonore entre deux pièces: les ondes sonores issues d'une pièce sont retenues dans le creux des agglos et ne peuvent traverser le mur de façon effective.

Défauts :

- ❖ La nécessité d'enduire considérablement les deux faces du mur, due à la visibilité des agglos dont la surface n'est pas assez lisse ;
- ❖ Un mur en agglos creux s'impose une épaisseur relativement importante ;
- ❖ Dans le cas où les agglos sont bourrés, le mur est favorable aux transferts thermique et phonique.

I.1.2. Constructions en béton banché (Mur de COFFOR)

C'est le mode de construction selon lequel le béton est coulé entre deux banches dont les dimensions correspondent à celles du mur visé.



Figure 2 : Constructions en mur de COFFOR à Olembé

Avantages :

- ❖ Très bonne résistance mécanique : il s'agit des murs porteurs ;
- ❖ Les constructions en béton banchées sont adaptées aux zones côtières où les surcharges dues au vent sont importantes. Le béton banché peut donc faire l'objet d'immeubles à grandes hauteur dans de telles zones ;

Défauts :

- ❖ Mauvais isolant phonique et thermique ;
- ❖ Nécessité importante de liant (matériaux assez cher) ;

- ❖ Mise en œuvre relativement laborieuse.

I.2. Famille des constructions en terre

La terre est le matériau de construction le plus vieux du monde. Il existe de très nombreuses variantes dans l'utilisation de la terre comme matériau de construction, qu'on peut diviser en deux grandes familles : la terre cuite (sous forme de briques, de tuiles ou de carreaux) et la terre crue (suivant les types suivants : Le pisé, Le torchis, l'adobe, le bloc de terre comprimé).

I.2.1. La terre cuite

Les BC sont des briques obtenues par cuisson dans un four (950°-1050°) des argiles fusibles. Au Cameroun, elles font l'objet d'étude en vue de la contribution à l'abaissement des coûts des logements.



Figure 3 : Briques Cuites

Avantages :

- ❖ Approche HIMO lors de la production et la mise en œuvre des briques ;
- ❖ Facilité de passage des gaines (d'électricité, de plomberie...);
- ❖ Bon régulateur thermique et acoustique ;
- ❖ Matériaux solide, inerte et non inflammable [MIPROMALO, 2004]
- ❖ Bonne texture (enduits facultatifs) ;

Défauts :

- ❖ Constructions peu répandues.

I.2.2. La terre crue

→ L'adobe

L'adobe est la brique de terre crue, obtenue par mélange de terre (le plus souvent argileuses) à de l'eau et éventuellement à une faible quantité de paille hachée ou d'une autre fibre séchée au soleil, et utilisée comme matériau de construction.



Figure 4 : Constructions en adobe

Avantages :

- ❖ L'adobe est un matériau écologique, entièrement recyclable après exploitation du bâtiment ;
- ❖ L'intérieur des constructions en adobe présentent un flux de chaleur faible avec l'extérieur ;
- ❖ La production de l'adobe se fait sans recours énergétique important et sans émission de gaz toxiques (effet de serre) [MIPROMALO, 2009]

Défauts :

- ❖ L'adobe de fabrication artisanale présente des propriétés mécaniques relativement faible ;
- ❖ Sous l'action de l'eau (humidité, eau de pluies, remontée...), le mur en adobe s'effrite et perd progressivement les propriétés initiales. D'autre part, la faible adhérence entre la terre crue et le mortier laisse croire qu'une construction en adobe sera toujours exposée au problème d'arrachement de matériaux.

→ **La brique de terre comprimée**

Les BTC sont des blocs de terre crue comprimée ou stabilisée au ciment ou à la chaux. Elle est utilisée aussi bien pour des bâtiments plains pieds que pour des bâtiments à hauteurs moyennes (2 à 3 niveaux) et aussi bien en zone rurale qu'en zone urbaine.



Figure 5 : Construction en BTC

Avantages :

- ❖ Construction peu onéreuse : dans le cas où production est faite sur le site de construction, les coûts de transport sont exclus ;
- ❖ Bon régulateur du climat interne de la maison (isolant thermique et acoustique) ;
- ❖ Technique de production et de mise en œuvre assez simple et à approche HIMO, [MIPROMALO, 2004]

Défauts :

- ❖ Les murs en BTC sont non porteurs lorsqu'elles jouent le rôle de remplissage et présentent une faible résistance à la compression (relativement aux briques cuites) ;
- ❖ Le passage des gaines à travers le remplissage de telles constructions est assez laborieux et fragilise l'ouvrage.

→ **Le pisé**

Le pisé représente le système de construction selon lequel la terre est damée (à l'aide d'un pisoir) par couche régulières dans des coffrages (appelés banches) de grande largeur qui se superposent pour constituer la hauteur des murs.



Figure 6 : Le pisé [AGENDEN, 2010]

Avantages :

- ❖ Les constructions en pisé privilégie la masse des murs et confère de ce fait à ces parois une grande inertie thermique. Une bonne isolation acoustique est aussi procurée par de tels murs ;

- ❖ La terre est un matériau saint : le pisé régule l'humidité de l'air (équilibre hygrométrique) ; Absorbe les odeurs ; Protège contre les ondes électromagnétiques ; ne provoque pas d'allergies, est Naturel, non toxique et sans ajout chimique.

Défauts :

- ❖ Les murs pisés sont très vulnérables aux effets de l'eau : eaux de ruissellement, eaux d'infiltration, eaux de toiture et rejaillissement des eaux de pluie. Il est donc nécessaire de prendre des précautions de mise en œuvre sans lesquelles la durabilité de la construction est compromise ;
- ❖ Le pisé impose une grande épaisseur du mur (minimum 30cm, jusqu'à 120 cm) ;
- ❖ Les constructions en pisé ont généralement une contrainte de limitation de hauteur ; elles ne peuvent donc pas faire l'objet des constructions dans les zones urbaines à forte demande en habitat.

I.3. Famille des constructions en bois

Nous nous intéresserons ici aux constructions en bois massif ou en fibre de bois, le bois transformé (lamellé collé ...) ne faisant pas beaucoup l'objet de construction des maisons à usage d'habitation dans le contexte camerounais. On distingue principalement les calabotes, les rondins, les huttes, les bambous de chine et de raphia.

I.3.1. Les calabotes

Ces constructions sont celles selon lesquelles les fondations presque inexistantes sont représentées par des piquets enfouis dans le sol, l'ossature est composée de lattes ou de chevron (dont l'espacement varie de 2 à 3 mètres) et le remplissage de planches disposée le plus souvent horizontalement. Les constructions en calabotes se situent en majorité dans les régions côtières (Littoral, Sud-ouest).



Figure 7 : Construction en Calabotes [Ekstrom, 2008]



Avantages :

- ❖ Coût de construction assez faible ;
- ❖ Facilité de mise en œuvre ;
- ❖ Construction en matériau local d'où la limitation des importations
- ❖ Mise en œuvre essentiellement avec l'approche HIMO ;

Défauts :

- ❖ Construction sensible aux flux de température ;
- ❖ Constructions présentant généralement des fondations non (ou mal) hérissonnées, d'où la dégradation précoce des piquets d'ossature enfouis dans le sol et des planches de soubassement, sous l'action combinée des remontées d'eau par capillarité et des insectes.

I.3.2. Les rondins

Ce sont des constructions dont le remplissage est fait par les troncs d'arbustes ou les branches des grands arbres. Il est possible ici d'opter pour une architecture verticale ou horizontale.



Figure 8 : Construction en rondins

Avantages :

- ❖ En zone forestière, de telles constructions sont très peu coûteuse du fait de l'abondance de la quasi-totalité des matériaux nécessaire à leur réalisation ;
- ❖ Facilité de mise en œuvre ;
- ❖ Construction en matériau local d'où la limitation des importations ;
- ❖ Mise en œuvre essentiellement avec l'approche HIMO ;

Défauts :

- ❖ Constructions sensibles aux flux de températures : les rondins utilisés peuvent subir un retrait différentiel important sous l'effet de la température, ce qui a pour effet la réduction des performances architecturales et mécaniques de l'ouvrage ;

❖ Du fait de la non uniformité naturelle des branches de bois, des petites ouvertures naissent généralement lors de l'agencement des deux branches, favorisant ainsi le passage des courants d'air, des rayons solaires, des insectes et de beaucoup d'autres éléments étrangers au local dont l'effet n'est le plus souvent pas positif pour les occupants.

I.3.3. Les huttes

Rencontrées principalement dans les régions de l'Est et du Sud Cameroun, les huttes constituent la principale typologie de construction chez les Hommes de forêt (pygmées...).



Figure 9 : Huttes à l'Est Cameroun

Avantages :

- ❖ Facilité de mise en œuvre ;
- ❖ Construction en matériau local : valorise les ressources locales d'où la limitation des importations ;
- ❖ Mise en œuvre essentiellement avec l'approche HIMO ;

Défauts :

- ❖ Construction procurant aux occupants un faible niveau de sécurité ;
- ❖ Rapidité de propagation des flammes (en cas d'incendie) ;
- ❖ Constructions sensible à la propagation du son et de la chaleur, d'où l'inconfort acoustique et thermique des usagers ;
- ❖ Ce type est limitée en hauteur.

II. Propriétés des matériaux de construction

Il en existe plusieurs qui peuvent être regroupées en quatre grandes classes à savoir les propriétés physiques, chimiques, mécaniques et technologiques.



II.1. Propriétés physiques

Elles font appel aux notions de poids/masse volumique, de densité, de perméabilité aux liquides, aux gaz, à la chaleur, aux émanations radioactives, aux notions de résistances et l'agressivité de l'ambiance, masse spécifique, porosité, humidité, perméabilité, degré d'absorption d'eau, variation de dimension en fonction de la teneur en eau.

II.2. Propriétés chimiques (l'alcalinité, l'acidité etc.)

Les propriétés chimiques font appel aux notions relatives aux bases et aux solutions salines. Il s'agit de la capacité des matériaux à réagir par contact avec d'autres matériaux ou avec l'air ambiant (en exemple, on peut noter l'alcali réaction).

II.3. Thermiques

L'isolation joue un rôle fondamental pour la réduction des consommations énergétiques et également pour créer un espace de vie sain et plus confortable. En saison humide, l'isolation permet de garder la chaleur à l'intérieur et donc de limiter les déperditions thermiques du bâtiment. En saison sèche, elle permet également de limiter le flux de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment. Les matériaux isolant sont caractérisés par un ensemble de propriétés thermiques bien précises qui permettent à la fois de les comparer entre eux et de définir leur application la plus appropriée. Nous pouvons citer en autre :

La conductibilité thermique :

C'est la capacité du matériau de laisser passer la chaleur à travers son épaisseur. Elle est caractérisée par le coefficient de conductivité thermique (λ en W/m.K), égale à la quantité de chaleur traversant un échantillon de 1m d'épaisseur, de 1m² de surface pendant une heure.

La différence de température entre les deux faces parallèles opposées étant d'un degré Celsius. Elle dépend de la structuration du matériau, de sa nature et de la porosité. Plus les pores augmentent, plus le coefficient augmentent (Pores communicants).

La capacité calorifique :

C'est la capacité d'absorber la chaleur, elle est caractérisée par la chaleur spécifique ; qui est la quantité de chaleur dépensée pour élever de 1°C la température de 1 kg du matériau. La chaleur spécifique est déterminée par :

$$C = \frac{Q}{m (t_2 - t_1)} \quad \text{en J / Kg } ^\circ\text{C}$$



Q : Quantité de chaleur dépensée pour élever la chaleur de t_1 à t_2 , en joule (J)

m : masse du matériau.

t_1, t_2 , température du matériau avant et après chauffage.

La résistance au feu :

C'est le pouvoir d'un matériau de résister à l'action des hautes températures sans perte de capacité portante (résistance et déformation). Tous les matériaux de construction sont divisés en matériaux incombustibles, peu combustible et combustible. Parmi les matériaux qui ne se consomment pas (incombustible) on a : les minéraux naturels, artificiel et les métaux. Certains soutiennent le feu le plus violent sans se fissurer ni se déformer, exemple : la brique et l'argile ; les autres, tel l'acier subit des déformations importantes.

II.4. Acoustiques

Les propriétés acoustiques d'un matériau représentent sa capacité à se laisser traverser par une onde sonore. Les principaux bruits auxquels peuvent être exposé une pièce sont les bruits aériens, les bruits d'impacts et les bruits techniques.

II.5. Propriétés mécaniques (résistance en compression, en traction, en torsion etc.)

Les propriétés mécaniques évoquent le pouvoir d'un matériau à résister aux chocs, à l'attrition (usure par frottement), à la compression, à la traction, à la flexion, aux actions résultants de l'application d'une force, à ainsi qu'à l'enfoncement d'un corps étranger. À cet effet, ils existent beaucoup d'essais de mesure de performance mécanique d'un matériau en fonction de mode de sollicitation.

II.6. Propriétés technologiques (maniabilité, ouvrabilité)

Il s'agit ici de l'aptitude des matériaux à subir un traitement visant la fabrication des différents produits de construction.

III. Les matériaux associés aux constructions

III.1. Matériaux de fondations

La fondation est l'ouvrage dont le rôle est de transmettre au sol en toute sécurité, les charges et surcharges qui arrivent sur elle. Dans le cas du bâtiment, le choix du type de fondation d'une part et du matériau de fondation d'autre part est assez délicat, car en plus des contraintes



économiques et de résistance telles que pour les autres ouvrages, le confort des usagers doit être assuré via une bonne étanchéité à l'exemple du phénomène de remontée capillaire. Les principaux matériaux pouvant faire l'objet de fondation dans le contexte camerounais sont :

- Les moellons
- Le béton armé
- Les agglomérés
- Les briques de terre cuite

III.2. Les matériaux d'élévations

Sont ainsi désignés, les matériaux de structure et de remplissage.

III.2.1. Matériaux de structure

Le rôle des matériaux de structure est d'assurer la stabilité et la sécurité d'une construction, notamment au niveau des sollicitations mécaniques et de la tenue au feu. Ils ont pour rôle de supporter les charges et les surcharges du bâtiment et de les transmettre en toute sécurité à la fondation. Les matériaux les plus aptes à le faire sont :

- Le bois
- L'acier
- Le béton armé

III.2.2. Matériaux de remplissage

Bien que n'ayant pas de véritables avantages structurels, les matériaux de remplissage doivent hériter de beaucoup de performances. Les matériaux de remplissage présentent la gamme la plus élargie et mérite une étude de choix assez stable. Ces matériaux se présentent au Cameroun sous les formes :

- Le bois
- La terre
 - Adobe
 - Brique de terre cuite
 - Brique de terre stabilisée (comprimée, stabilisée au ciment ou à la chaux...)
 - Terre crue
- Le béton (agglos, béton banché ...)



III.2.3. Matériaux de charpente

La charpente désigne la partie du bâtiment dont le principal rôle est de reprendre les charges et surcharges dues à la couverture. Se présentant généralement sous forme de treillis, les résistances à la compression et à la traction des éléments constitutifs doivent être assurée.

Ces matériaux sont :

- L'acier
- Le bois
 - Bois massif
 - Les bambous
- Les métaux

III.2.4. Matériaux de couverture

Le matériau de couverture est celui dont le rôle est de protéger l'ouvrage des intempéries (eaux de pluies, ...). Ces matériaux sont :

- Les métaux :
 - Aluminium
 - Zinc
- Les tuiles
 - Tuiles de béton
 - Tuiles de terre cuite
- Les végétaux :
 - La paille
 - Le raphia

Après avoir cité tous ces types de matériaux, nous avons aussi les matériaux de revêtements, de menuiserie et de plafond que nous trouverons dans un tableau récapitulatif en annexe 2.



CHAPITRE III : CRITERES D'EVALUATION DES MATERIAUX ET APPORT DE L'ANALYSE MULTICRITERE

I. Examen des critères d'évaluation

Les principaux critères d'évaluation seront ainsi décrits et associé aux exigences de la démarche haute qualité environnement (HQE) dont les principales cibles sont les suivantes :

- Cible n°1 : Relation harmonieuse du bâtiment avec son environnement immédiat,
- Cible n°2 : Choix intégré des procédés et des produits de construction,
- Cible n°3 : Chantier à faibles nuisances,
- Cible n°4 : Gestion de l'énergie,
- Cible n°5 : Gestion de l'eau,
- Cible n°6 : Gestion des déchets d'activité,
- Cible n°7 : Gestion de l'entretien et de la maintenance,
- Cible n°8 : Confort hygrothermique,
- Cible n°9 : Confort acoustique,
- Cible n°10 : Confort visuel,
- Cible n°11 : Confort olfactif,
- Cible n°12 : Qualité sanitaire des espaces intérieurs,
- Cible n°13 : Qualité sanitaire de l'air,
- Cible n°14 : Qualité sanitaire de l'eau.

Il est donc important que notre choix soit fait en ayant un regard sur ces cibles, auxquelles nous allons associer des contraintes de coût, de résistance et de conformité.

I.1. Coût

Après avoir défini l'UF comme étant l'unité fonctionnelle et la DVT comme étant la durée de vie typique des composantes du bâtiment, nous allons nommer A l'activité liée à la réalisation d'une composante. Cette activité pourra se décomposer en sous activités A_i et effectuer la reconstitution par $A = \sum_{k=1}^n Ak$ ou éventuellement sous la forme pondérée $A = \sum_{k=1}^n \alpha_k Ak$ où les (α_k) forment une famille libre. Le coût d'une solution constructive sera généralement obtenu selon par :

$$C_T = C_{Mx} + C_{MI} + C_{Moe} \quad \text{Avec :} \quad \begin{cases} C_{Mx} : \text{Coût des matériaux} \\ C_{MI} : \text{Coût du matériel} \\ C_{Moe} : \text{Coût de la main d'œuvre} \end{cases} \quad [3.1]$$



En recensant toutes les sous activité de la solution constructive, nous pouvons évaluer le coût de la sous activité k par : $C_T = C_{Mx,Ak} + C_{MI,Ak} + C_{Moe,Ak}$

Et le coût total sera récapitulé de la manière suivante :

$$C_T = \sum_{K=1}^n C_k = \sum_{K=1}^n [C_{Mx,Ak} + C_{MI,Ak} + C_{Moe,Ak}]$$

Avec :

$$\begin{cases} C_{Mx} : \text{Coût des matériaux de la sous activités } A_k \\ C_{MI} : \text{Coût du matériel de la sous activités } A_k \\ C_{Mo} : \text{Coût de la main d'œuvre de la sous activités } A_k \end{cases} \quad [3.2]$$

I.2. Résistance

En utilisant les typologies issues de [Destrac et al., 2000], nous avons identifié trois catégories de performances techniques liée à la résistance, qui dépendent de l'élément ou du composant étudié : la résistance mécanique, l'étanchéité, la résistance au feu.

➤ **La résistance mécanique** : elle dépend des éléments sollicités, cette résistance inclut : la résistance en traction, la résistance en compression, la résistance en cisaillement, la résistance en flexion, l'adhérence, la résistance aux chocs, la résistance au poinçonnement, etc. Chaque élément dispose donc d'une résistance mécanique qui lui est propre. Toutes les données attestant de cette résistance mécanique peuvent être disponibles auprès des fabricants ou par des essais in situ ou en laboratoire.

➤ **La résistance au feu** : elle est caractérisée par la durée de stabilité au feu (SF), la durée de coupe-feu (CF) et/ou la durée de pare-flamme (PF). La résistance au feu doit être testée et connue pour chaque élément.

I.3. Confort

La phase d'exploitation est sans doute la plus longue du cycle de vie des bâtiments. La maîtrise du confort des usagers se veut donc incontournable lors de l'analyse du cycle de vie de l'ouvrage. Il s'agit principalement des confort thermique, acoustique, visuel et olfactif.

➤ **Le confort thermique** : la résistance thermique R d'un élément correspond à la capacité de cet élément à s'opposer au passage de la chaleur à travers lui-même. Les résistances thermiques de chaque élément (en $m^2 \cdot K/W$) peuvent donc directement être additionnées, à condition que les données soient disponibles dans une base de données (dans les FDES par exemple dans le contexte Français), pour obtenir la résistance thermique totale de la solution



constructive. La résistance thermique s'obtient par la formule suivante : $R = e/\lambda$ où e représente l'épaisseur de l'élément étudié (en m) et λ la conductivité thermique du matériau (en W/mk).

➤ Le **Confort acoustique** : La résistance acoustique, ou indice d'affaiblissement acoustique, indique de combien de décibels un élément réduit les bruits aériens. Si cet indice peut être calculé pour chaque élément individuellement, par la loi de masse notamment, la résistance acoustique de l'association d'éléments (plusieurs couches superposées) ne peut en général être déterminée que par des mesures. Elle nécessite même, dans la plupart des cas, d'être étudiée à l'échelle d'une pièce, car elle dépend de nombreux paramètres, notamment la présence ou non de couche d'air entre les éléments (notion de dureté du « ressort »). Il est néanmoins important de remarquer que ce sont les éléments de menuiserie (fenêtres, portes...) qui représentent les plus grandes « fuites » acoustiques dans un bâtiment.

$$R = L1 - L2 \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} R : \text{indice d'affaiblissement de la paroi (dB)} \\ L1 : \text{Niveau d'intensité sonore émise (dB)} \\ L2 : \text{Niveau d'intensité sonore reçue (dB)} \end{cases} \quad [3.3]$$

➤ Le **Confort Visuel** (transmission et réflexion lumineuse) : Ces propriétés ne concernent que les éléments de type « vitrage ». La transmission lumineuse correspond à la capacité d'un vitrage à transmettre la lumière solaire (en %). La réflexion lumineuse correspond à la capacité d'un vitrage à réfléchir la lumière solaire (en %).

- Le **Confort olfactif** : les odeurs peuvent provenir de différentes origines telles que :
- Les produits de construction (matériaux, revêtements, isolants, etc.) ;
 - Les activités présentes au sein du bâtiment (entretien, travaux, etc.)
 - Le milieu environnant le bâtiment (sol, air extérieur, etc.)
 - Les usagers (leurs activités et leurs comportements).

I.4. Esthétique

Le critère esthétique est assez délicat et son évaluation est qualitative. La performance des matériaux relativement à ce critère pourra dépendre du responsable de l'ouvrage et l'évaluation finale se fera par transformation en évaluation quantitative, ce qui suivra la logique définie dans le tableau ci-après :

Tableau 1 : Normation du critère esthétique

Evaluation qualitative	Normation
Pas assez beau	1
Assez beau	2
Beau	3
Très beau	4

I.5. Disponibilité

Concernant la disponibilité des produits de constructions, deux principaux aspects seront observés :

- La distance du lieu de réalisation du projet à la source de production ou de distribution des matériaux ;
- La maîtrise des stocks des produits.

I.6. Impact environnemental

La qualité environnementale est un concept qui regroupe pour des choix de société des normes, des objectifs de respect de l'environnement, de développement durable ainsi que des critères plus subjectifs comme la qualité de vie. La notion de qualité environnementale prend donc en compte non seulement la dimension de l'impact d'un choix de matériau sur son environnement au sens large (économique et écologique), mais aussi son impact sur la manière dont la population concernée par ces choix les vive et les ressent au quotidien (en bien ou en mal).

L'objet d'une étude d'impact sur l'environnement est d'identifier, d'évaluer et de mesurer les effets directs et indirects à court, moyen et long terme d'un projet et de proposer les mesures adéquates pour limiter les effets négatifs du projet. Dans le cadre des matériaux de construction, les principaux éléments constitutifs de l'impact environnemental d'un produit de construction sont les suivants :

- Consommation de ressources énergétiques (en kg ou MJ)
- Épuisement des ressources (en kg d'antimoine équivalent)
- Consommation d'eau (en L)
- Déchets solides (en kg)
- Changement climatique (en kg équivalent CO₂)
- Acidification atmosphérique (en kg équivalent SO₂)



- Pollution de l'air (en m³ d'air nécessaire à diluer les produits)
- Pollution de l'eau (en m³ d'eau nécessaire à diluer les produits)
- Destruction de la couche d'ozone stratosphérique (en kg équivalent CFC11)
- Formation d'ozone photochimique (en kg équivalent éthylène (C₂H₂))

I.7. Impact social

Ici, c'est l'impact de la construction sur la société il s'agit principalement de :

- Privilégier le recours à une haute intensité de main-d'œuvre (HIMO) tant au moment de la production des matériaux que de la réalisation du bâtiment [DSCE, 2008] ;
- Inventorier et qualifier la main d'œuvre disponible dans les zones de réalisation des projets et assurer une large diffusion des postes et qualifications recherchés, si nécessaire former la main d'œuvre recrutée,
- Se conformer à la réglementation en matière de sécurité sur les chantiers déconstruction.

I.8. Conformité (existence d'une norme, conformité à la norme)

Le critère conformité concerne essentiellement l'existence d'une norme relative au produit de construction concerné et/ou la conformité du matériau (le cas échéant) à cette norme. Dans le contexte Camerounais, c'est l'Afnor qui fournit de telles informations via la base de données constituée de ses normes et des normes élaborées par des organismes de normalisation reconnus par celle-ci. La note 1 (oui) sera attribuée aux matériaux qui respectent de telles règles et 0 (non) aux autres matériaux.

Il faut noter qu'une telle évaluation n'a plus besoin de normation et pourra directement faire l'objet d'agrégation en vue du choix.

Les sens de préférences de chaque critère et sous critères sont dans le tableau 3 *en annexe 3* suivant ainsi que les parties du bâtiment concernées.

Les cases colorées désignent que le composant du bâtiment est concerné par le critère/sous-critère correspondant.

Le signe (↗) signifie qu'une alternative (a) est meilleur qu'une alternative (b) relativement au critère considéré, si elle prend une plus grande valeur pour ce critère. Le signe (↘) signifie l'inverse.

Une alternative (a) est, selon le critère à évaluation booléenne « conformité » noté 1 si le matériau respecte les normes prévues par l'ANOR ou par un organisme de Normalisation reconnu par celle-ci.

Il est nécessaire de connaître ce sens pour chaque critère, et de le transformer, le cas



échéant, avant l'agrégation pour qu'il soit commun à tous les critères. Pour que le sens des préférences soit commun à tous les critères, deux types de transformation des évaluations peuvent être envisagés pour les critères quantitatifs : transformation par l'inverse, ou transformation par l'opposée. Nous préférons la seconde option, pour sa simplicité de mise en œuvre ainsi que pour sa conservation des échelles, des unités et de la signification des évaluations.

Pour comparer les produits il sera important de définir également pour chaque produit de construction l'UF (1m² pour un produit de couverture, un revêtement ou 1ml pour une canalisation par exemple) et la DVT. La disponibilité des inventaires du cycle de vie des produits de construction est aussi une hypothèse forte de la modélisation car elle conditionne la construction des familles cohérentes de critères. Dans le contexte Camerounais, ces inventaires ne sont pas effectifs et l'hypothèse que nous émettons est l'importation des données environnementales à partir de la base de données INIES, base de référence du cahier des charges formulées par le CSTB, au format de la norme NF P01-010.

II. Pondération des critères

Nous appelons poids la mesure de l'importance relative entre les critères telle qu'elle est vue par le décideur. Néanmoins, cette mesure n'est pas toujours déterminée facilement par le décideur dans bien des situations, et des méthodes pour évaluer les poids des critères [Maystre et al., 1994] sont développées pour pallier cette difficulté. La pondération des critères correspond donc à l'attribution à chaque critère de choix un poids qui dépend de plusieurs paramètres et peut être déterminé par plusieurs méthodes parmi lesquelles : l'analyse pondérée, le vote pondéré, la méthode de l'entropie, la hiérarchisation des critères.

- **L'analyse pondérée** : cette analyse consiste à mettre les critères en compétition par paire et d'attribuer 1 point au critère vainqueur et 0 point au perdant. À la fin, le poids du critère est la somme de ses notes obtenues à l'issue de toutes ses compétitions, éventuellement ramené en pourcentage. La disposition des résultats est sous forme de matrice $A = (a_{ij})$ dont la diagonale (a_{ii}) est constituée de 1, signifiant l'auto dominance de chaque critère et l'élément est donné par :

$$\begin{cases} a_{ij} = 1 \text{ si le critère } j \text{ domine le critère } i \\ a_{ij} = 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

- **Le vote pondéré** : il est généralement appliqué en salle de réunion pour retenir une alternative (un projet par exemple) parmi tant d'autres. Dans le cas de la pondération des



critères, le principe consiste à la disposition de chaque membre concerné par le choix 6 points qu'il doit répartir sur 3 critères qui lui paraissent les plus importants parmi tous ceux qui ont été retenus. Parmi ces trois critères, on attribue :

- 3 points à celui qui lui paraît le plus important,
- 2 points à celui qui vient en deuxième,
- 1 point seulement au troisième.

Ensuite, on fait le total des points obtenus par chaque critère et on le ramène éventuellement sous forme de pourcentage.

- **La méthode de l'entropie**, qui permet de déterminer des pondérations en tenant compte uniquement des dispersions des évaluations selon chaque critère, c'est-à-dire en accordant une importance supérieure aux critères plus discriminatoires ; cette méthode présente l'avantage de ne pas faire intervenir la subjectivité du décideur, et peut apporter une solution à la pondération dans les situations conflictuelles. Cependant, elle peut accentuer la compensation entre les critères dans les méthodes d'agrégation totale, et il convient donc de l'utiliser avec précaution (en modulant les résultats obtenus par exemple) ;
- La **hiérarchisation des critères** par l'utilisateur, transformée ensuite en jeu de pondération par la méthode AHP ou la méthode MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TechNique). Ces méthodes présentent l'avantage de faire intervenir les priorités de l'utilisateur, sans le contraindre à donner directement des poids.

III. Problème d'aide au choix (non commensurabilité des critères)

De ce qui précède, nous constatons que le choix des matériaux de construction dépend d'un nombre important de critères. Ces différents critères définissent différent mode d'évaluation des alternatives présentes. On observe ainsi :

- Les critères à évaluation quantitative : ils sont à priori, les plus faciles à utiliser pour une agrégation. Ils présentent cependant le problème d'uniformité d'unité et nécessitent une normalisation au niveau des sous critères ;
- Les critères à évaluation qualitative : à l'exemple de l'esthétique, l'évaluation se fait avec les notes : pas assez beau, assez beau, beau, très beau ;
- Les critères à évaluation binaires (booléenne) : c'est le cas de la conformité. Un matériau sera dit conforme dans le contexte Camerounais s'il a bénéficié d'un certificat de conformité



établi par l'ANOR ou par une agence de normalisation reconnue par celle-ci. Le matériau pourra donc avoir la note 1 (vrai) si c'est le cas et 0 (faux) sinon.

IV. Apport de l'analyse multicritère

L'analyse multicritère est un outil d'aide à la décision développé pour résoudre des problèmes multicritères complexes qui incluent des aspects qualitatifs et/ou quantitatifs dans un processus décisionnel. La méthodologie de résolution d'un problème multicritère consiste de prime abord à définir les actions possibles et dégager leurs conséquences respectives en vue d'établir les préférences de l'acteur de la décision ; ensuite, les critères sont établis et pondérés sous forme de famille cohérente, puis chaque alternative est évaluée relativement à chaque critère.

IV.1. Actions et acteurs de la décision

La formulation d'un problème passe par une bonne compréhension de la situation étudiée, du contexte, des actions possibles et des acteurs impliqués dans la prise de décision.

➤ **Les actions :**

Une action correspond à la représentation des « solutions possibles » envisagées dans un processus de décision, c'est l'élément qui va faire l'objet de la comparaison dans un ensemble bien défini [ROY, 1985]. On distingue plusieurs types d'action, dont :

- **L'action potentielle**
- **L'action globale**
- **L'action partielle ou fragmentaire**

➤ **Les acteurs de l'aide à la décision :**

Un individu ou un groupe d'individus est acteur d'un processus de décision si, que ce soit au premier degré du fait des intentions de cet individu ou groupe d'individus ou au second degré par la manière dont il fait intervenir ceux d'autres individus, il influence directement ou indirectement la décision. Toutefois, nous avons :

L'acteur principal du processus d'aide à la décision est le ou les décideurs, qui sont parfois difficiles à identifier. Ils apprécient ce qui est possible ainsi que les finalités du processus. Ils expriment leurs préférences et doivent les faire valoir dans l'évolution du processus d'aide à la décision [Chevalier, 1999].



Le **second acteur** considéré par l'aide multicritère à la décision est le demandeur de l'étude. Il joue un rôle important d'orchestration du processus d'aide à la décision. Il peut être confondu avec le décideur.

Les **intervenants** sont des personnes qui cherchent à influencer les décideurs au cours du processus d'aide à la décision en fonction de leurs systèmes de préférences. Les autres acteurs sont les **agis**, ils subissent les conséquences de la décision sans pouvoir l'influencer. Toutefois, leurs avis sont indirectement pris en compte par les acteurs précédents. D'autres acteurs dits **fantômes** agissent comme intermédiaires et ne participent pas directement au processus : les conseillers, les négociateurs, les informateurs et les juges-arbitres. L'homme d'étude (celui qui réalise l'aide à la décision) et le demandeur (s'il est différent du décideur) sont eux aussi des intermédiaires.

➤ **Les acteurs de notre outil d'aide au choix des produits de construction**

Les acteurs de notre outil d'aide au choix des matériaux de construction sont à la fois des acteurs d'un projet de construction, et des acteurs pour lesquels est réalisée l'aide à la décision.

IV.2. Conséquences d'une action

Il s'agit en effet d'identifier et mesurer les conséquences des actions sur lesquelles va porter la décision. Les critères découlent des conséquences des actions. Souvent, une action a plusieurs conséquences, ainsi la conséquence d'une action selon un critère donné est évaluée par une fonction g (à valeurs réelles) définies sur l'ensemble A des actions potentielles de telle sorte qu'il soit possible de raisonner ou de décrire le résultat de la comparaison de deux actions a et b relativement à partir des nombres $g(a)$ et $g(b)$. L'évaluation de l'action sera donc effectuée sur un ensemble de critères. On distingue le *vrai-critère* et le *pseudo-critère*.

Pour le vrai critère, en considérant deux actions a et b à comparer, deux situations sont possibles :

$$\left\{ \begin{array}{l} g(a) = g(b) \Leftrightarrow b \text{ I}_g a \text{ (indifférence)} \\ \text{et} \\ g(b) > g(a) \Leftrightarrow b \text{ p}_g a \text{ (préférence)} \end{array} \right. \quad [3.4]$$

C'est une vision peu réaliste car une simple différence $g(b)-g(a)$ n'est pas significative d'une préférence stricte.



Pour le pseudo-critère on associe à la fonction critère g deux fonctions seuils $q_g(g(a))$ exprimant un **seuil d'indifférence** $p_g(g(a))$ et exprimant un **seuil de préférence**.

$$g(b) \geq g(a) \Rightarrow b S_b a \quad [3.5]$$

S_b : « **aussi bon que** » ou, S c'est une relation de sur-classement, c'est à dire que b est au moins aussi bon que a sur une majorité de critères sans être vraiment plus mauvais relativement sur les autres critères. On dira dans ce cas que b surclasse a , on notera $b S_b a$. On introduit des seuils (constants ou fonction de g) tels que :

$$\left\{ \begin{array}{l} g(b) - g(a) = q_g(g(a)) \Leftrightarrow b I_g a \text{ (indifférence)} \\ p_g(g(a)) < g(b) - g(a) \Leftrightarrow b p_g a \text{ (préférence)} \end{array} \right. \quad [3.6]$$

Où q_g est un seuil dit d'indifférence et p_g un seuil dit de préférence.

La situation non couverte par ces deux éventualités, à savoir :

$$q_g(g(a)) < g(b) - g(a) \leq p_g(g(a)) \quad [3.7]$$

Correspond à une situation d'**hésitation** (indétermination) entre l'indifférence et la préférence stricte appelée **préférence faible** et notée Q_g .

IV.3. Critères

Les critères découlent des conséquences des actions, il s'agit de "tout effet ou attribut de l'action susceptible d'interférer avec les objectifs ou avec le système de valeurs d'un acteur du processus de décision, en tant qu'élément primaire à partir duquel il élabore, justifie ou transforme ses préférences". Une action ayant difficilement une seule conséquence, il nous faudra tirer les conséquences élémentaire c parmi l'ensemble des conséquences $v(a)$. De la conséquence c , on aboutit à la notion d'indicateur d'état γ_c qui est une procédure, règle ou technique qui sert à attribuer une valeur à l'état qui, selon toute vraisemblance, se réalisera si l'action est mise à exécution. À ces indicateurs d'état sont éventuellement associés des indicateurs de dispersion $\delta(a)$, servant à moduler la vraisemblance des différents états. On en arrive ainsi à l'évaluation globale de l'action selon n critères :

$$\Gamma(a) = \left[\gamma_i(a), \delta_i(a) \mid i=1, \dots, n \right] \quad [3.8]$$

Cette évaluation permet, à l'aide d'un éventuel codage, de définir des fonctions-critères ou critères g , dont les γ sont les paramètres. Pour une fonction g , deux actions a' et a seront comparées de la façon suivante :

$$g(a') \geq g(a) \Rightarrow a' S a \quad [3.9]$$



Où S désigne une relation de surclassement.

Une **relation de surclassement** est une relation binaire définie sur l'ensemble A des actions, dont la signification est la suivante : « une action a surclasse une action b si l'on peut affirmer sans risque d'erreur que le décideur préfère a à b ». On note **aSb**. Une relation de surclassement s'apparente donc ainsi de très près à une relation de préférence : elle représente ce que la modélisation sait des préférences du décideur.

Il existe alors différents types de critères dont les définitions font apparaître les expressions $q_g [g(a)]$ et $p_g [g(a)]$. Elles désignent respectivement les **seuils d'indifférence** et de **préférence**. Voici les principaux types de critères utilisés :

Pseudo-critère : fonction-critère g à laquelle se trouvent associées deux fonctions seuils

$q_g [g(a)]$ et $p_g [g(a)]$ sont telles que :

$$\left[\begin{array}{l} a' I_g a \text{ Si } g(a') - g(a) \leq q_g [g(a)] \text{ (indifférence)} \\ a' Q_g a \text{ si } q_g [g(a)] < g(a') - g(a) \leq p_g [g(a)] \text{ (Préférence faible)} \\ a P a \text{ Si } p_g [g(a)] < g(a') - g(a) \text{ (préférence)} \end{array} \right. \quad [3.10]$$

Vrai critère : pseudo-critère où $q_g [g(a)] = p_g [g(a)] = 0$

Quasi-critère : pseudo-critère où $q_g [g(a)] = p_g [g(a)]$, $\forall a \in A$

Pré-critère : pseudo-critère où $q_g [g(a)] = 0$

L'ensemble de tous les critères élaborés doit respecter des exigences d'exhaustivité, de cohésion et de non-redondance.

IV.4. Problématiques de références

L'aide à la décision se veut donc un processus qui utilise un ensemble d'informations disponibles à un instant donné, afin de formuler un problème et aboutir à une décision sur un objet précis. Dans le cadre de la **décision multicritère**, l'objet de la décision est formé par un ensemble d'actions ou alternatives. Pour [les problèmes réels peuvent être formulés à l'aide des méthodes d'analyse multicritère, selon **quatre formulations de problématiques de base**, soit :

- Problématique du choix (**P α**) : elle consiste à la formulation du problème en termes de meilleur choix mais sans s'imposer d'aboutir à la mise en évidence de la solution dite optimale, tel que recherché dans les problèmes d'optimisation. La problématique de l'optimisation est donc un cas particulier de cette problématique de choix.

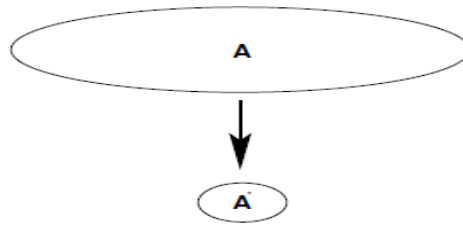


Figure 10 : Problématique du choix ($P\alpha$)

- Problématique du tri ($P\beta$) : elle pose le problème en termes de tri ou de répartition en diverses catégories. Ici, chaque action analysée est affectée à une et à une seule catégorie conçue pour orienter la décision ; chacune des catégories doit être homogène et indépendante. La frontière entre les différentes catégories doit être effective et bien définie : aucune catégorie ne doit faire référence à l'autre.

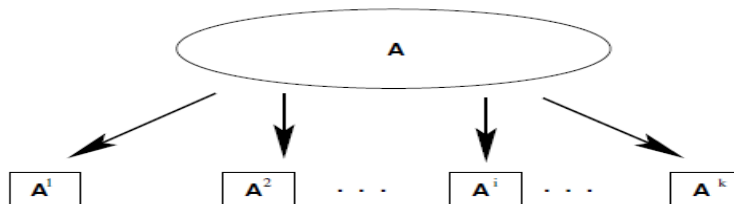


Figure 11 : Problématique du tri ($P\beta$)

- Problématique du rangement ($P\gamma$) : elle consiste à formuler le problème en termes de rangement selon un ordre de préférence ou en terme d'élaboration d'une procédure de classement. On cherche ici à tirer le maximum d'informations permettant de comparer entre eux, les éléments de l'ensemble d'action A, les ranger en classes afin de les ordonner complètement ou partiellement, en conformité avec les préférences de l'acteur de la décision.

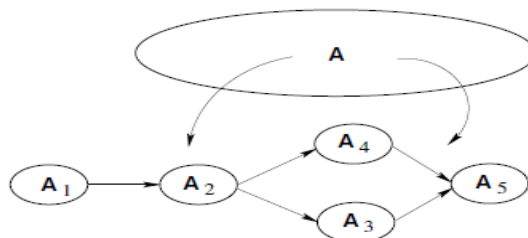


Figure 12 : Problématique du rangement ($P\gamma$)

- Problématique de la description ($P\delta$) : il s'agit ici de poser le problème en termes de description de toutes les actions à analyser ainsi que de leurs conséquences. Dans plusieurs cas, l'activité d'étude ne sort pas du cadre de cette problématique car elle reflète l'essentiel

de ce que le décideur attend : elle est plus ou moins incluse dans les problématiques précédentes et ne peut donc être une fin en soi.

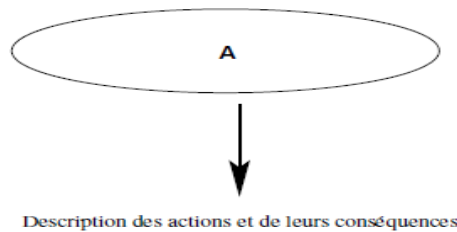


Figure 13 : Problématique de description ($P\delta$)

Face à un problème d'aide à la décision multicritère, la problématique adoptée peut correspondre soit à l'une des problématiques de référence, soit à une combinaison de ces problématiques (dans ce cas, chacune des problématiques choisies constitue une étape de déroulement du processus décisionnel).

Les objectifs et les résultats de ces différentes démarches sont résumés dans le tableau qui suit :

Tableau 2 : Identification des types de problématique [Roy, 1985]

Problématiques	Objectifs	Résultats
$P\alpha$	Eclairer la décision par le choix d'un sous ensemble en vue d'un choix final d'une seule action.	Un choix ou une procédure de sélection
$P\beta$	Eclairer la décision par un tri résultant d'une affectation de chaque action à une catégorie, les catégories étant, t définies a priori en fonction des normes ayant trait à la suite à donner aux actions qu'elles sont destinées à recevoir	Un tri ou une procédure d'affectation
$P\gamma$	Eclairer la décision par un rangement obtenu en regroupant tout ou partie (les «plus satisfaites») des actions en classes d'équivalence, ces classes étant ordonnées, de façon complète ou partielle	Un rangement ou une procédure de rangement
$P\delta$	Eclairer la décision par une description, dans un langage approprié, des actions et de leurs conséquences	Une description ou une procédure cognitive



V. Méthodes, outils existants et choix de l'outil d'aide au choix

V.1. Les méthodes d'agrégation complète transitive

Ce sont les méthodes basées sur un pré ordre total. Elles utilisent les vrais critères et définissent dans certains cas une fonction d'utilité donc l'optimisation fait l'objet de l'étude. Les principales méthodes d'agrégation totale sont les suivantes, d'après [Maystre et al., 1994] :

- Les modèles additifs et multiplicatifs (pondérés ou non), où les résultats d'évaluation de chaque action sont sommés ou multipliés et donnent une note globale à l'action (somme pondérée, moyenne pondérée, produit pondéré) ;
- Le goal programming, qui consiste à résoudre un problème linéaire ;
- La méthode Jouany-Vaillant, qui permet d'agréger des critères interactifs, dont le développement se poursuit par la méthode SIRIS (System of Integration of Risk with Interaction Scores) ;
- La théorie de l'utilité multi attribut (MAUT, « Multi Attribute Utility Theory ») ;
- La méthode UTA (UTilités Additives) ;
- La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process).

V.2. Les méthodes d'agrégation partielle

Ces méthodes sont basées sur un pré ordre partiel et utilisent des pseudo critères (critères à seuil). Il existe de très nombreuses méthodes d'agrégation partielle. Nous citons ci-dessous les principales méthodes, avec spécification de la problématique pour laquelle ou lesquelles elles ont été conçues initialement, d'après [Maystre et al., 1994] :

- La famille ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) développée principalement par Roy, (I, Is et Iv pour α , TRI pour β et II, III, IV pour γ) ;
- Les méthodes de Borda, Condorcet et Copeland, pour la problématique γ ;
- La méthode lexicographique, pour γ ;
- NAIADE (Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environment) qui peut être appliquée pour γ ;
- La segmentation trichotomique qui s'applique à β ,
- La famille PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations), I pour α et II pour γ ;
- La famille EXPROM (I pour α et II pour γ), qui correspond à une extension de la famille PROMETHEE,
- ORESTE (Organisation, Rangement Et Synthèse de données relaTionElles), pour γ ;



- REGIME pour γ (méthode ordinale) ;
- QUALIFLEX pour γ (méthode ordinale) ;
- MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TecHnique), pour α ou γ .

V.3. Choix de la méthode

Le choix de la méthode d'aide à la décision multicritère se fait selon l'arbre de choix établi par [Lemaire, 2006]. La méthodologie consiste de manière séquentielle à répondre aux interrogations suivantes :

- **Choix multicritère ou non ?** : le choix des produits de construction se faisant selon les cibles de la démarche HQE, il est indispensable de mettre plusieurs critères en exergue. Nous avons donc un **choix multicritère** à effectuer.
- **Type de problématique ?** : d'après le tableau de problématiques de références présenté en IV.1, et vu l'objectif de notre outil à satisfaire de façon large les acteurs de la construction, il serait meilleur de procéder à un classement d'alternatives par ordre de préférence. La problématique traitée sera donc γ (**rangement**).
- **Détermination des poids** : les critères selon lesquels les alternatives seront évaluées ne sont pas équipondéraux et se verront donc attribuer des poids. Il y aura bien **pondération des critères**.
- **Nature des critères** : il s'agit dans notre cas, des **critères à seuils**.

Les méthodes de choix présentes sur l'embranchement final de l'arbre sont : ELECTRE III, PROMETHE II et EXPROM II.

En conclusion, nous optons pour la méthode d'agrégation partielle **ELECTRE III**. L'arbre de décision nous sera présenté en *annexe 4*.

VI. Description et mise sur pieds de l'outil d'aide (Utilitaire ELECTREIII)

VI.1. Généralités

Les méthodes multicritères sont beaucoup plus proches de la réalité ce qui leur confère un atout majeur. Le principal reproche qui leur est fait est leur complexité et leur manque de transparence. Il faut toutefois remarquer que rien n'est arbitraire dans ces méthodes.



La méthode Electre-III est une méthode d'analyse multicritère qui permet de résoudre des problèmes de classement, la méthode s'appuie sur la définition d'une relation de sur-classement S permettant de comparer deux actions a et b distinctes.

En considérant un ensemble d'actions $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$, il s'agit de classer les actions en les comparant par paires. Chaque action est donc comparée aux autres sur la base des critères considérés. L'évaluation des actions est effectuée par une fonction réelle, pour chaque critère. On définit l'ensemble $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ contenant l'évaluation de l'action sur l'ensemble des critères.

L'importance des critères dans la prise de décision est évaluée par un ensemble de poids $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$. Pour cette méthode, les seuils d'indifférence, de préférence et de veto sont fonction de l'évaluation de l'action pour chaque critère. Pour une action a , évaluée par $g_j(a)$ pour le critère j , dans ce cas le seuil d'indifférence est noté $q_j(g_j(a))$, le seuil de préférence par $p_j(g_j(a))$ et le seuil de veto par $v_j(g_j(a))$. La méthode Electre III s'appuie sur les étapes suivantes :

→ **Evaluation des indices de concordance :**

Dans ce cas on considère le sens de préférence des critères considérés, on distingue un sens de préférence croissant et décroissant.

L'indice de concordance dans le cas de **préférence croissante** est obtenu comme suit :

$$C_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \geq p_j(g_j(a)) \\ 1 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \leq q_j(g_j(a)) \\ \frac{p_j(g_j(a)) - (g_j(b) - g_j(a))}{p_j(g_j(a)) - q_j(g_j(a))} & \text{Sinon} \end{cases} \quad [3.11]$$

Et dans le cas de **préférence décroissante**, on a :

$$C_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \leq -p_j(g_j(a)) \\ 1 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \geq -q_j(g_j(a)) \\ \frac{p_j(g_j(a)) + g_j(b) - g_j(a)}{p_j(g_j(a)) - q_j(g_j(a))} & \text{Sinon} \end{cases} \quad [3.12]$$

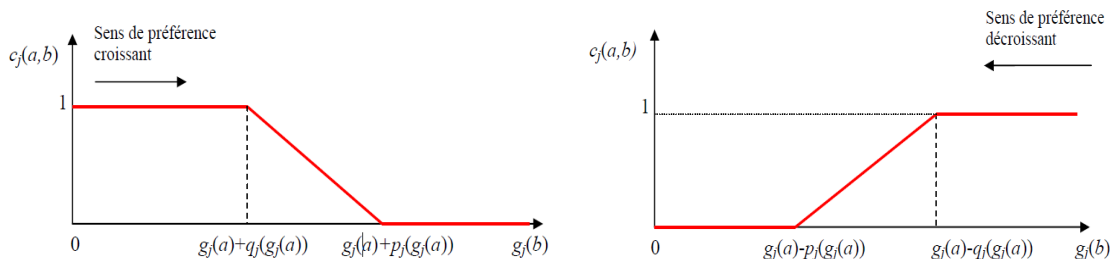


Figure 14 : Détermination de l'indice de concordance [Nafi et Wery, 2010]



→ **Calcul de l'indice de concordance global :**

$$C(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^n K_j * C_j(a, b)}{\sum_{j=1}^n K_j} \quad [3.13]$$

→ **Évaluation des indices de discordance :**

Dans ce cas on considère le sens de préférence des critères considérés, on distingue un sens de préférence croissant et décroissant.

L'indice de discordance dans le cas de **préférence croissante** est obtenu comme suit :

$$D_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \leq p_j(g_j(a)) \\ 1 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \geq v_j(g_j(a)) \\ \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j(g_j(a))}{v_j(g_j(a)) - p_j(g_j(a))} & \text{Sinon} \end{cases} \quad [3.14]$$

Et dans le cas de **préférence décroissante**, on a :

$$D_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \geq -p_j(g_j(a)) \\ 1 & \text{si } g_j(b) - g_j(a) \leq -v_j(g_j(a)) \\ \frac{-(g_j(b) - g_j(a)) - p_j(g_j(a))}{v_j(g_j(a)) - p_j(g_j(a))} & \text{Sinon} \end{cases} \quad [3.15]$$

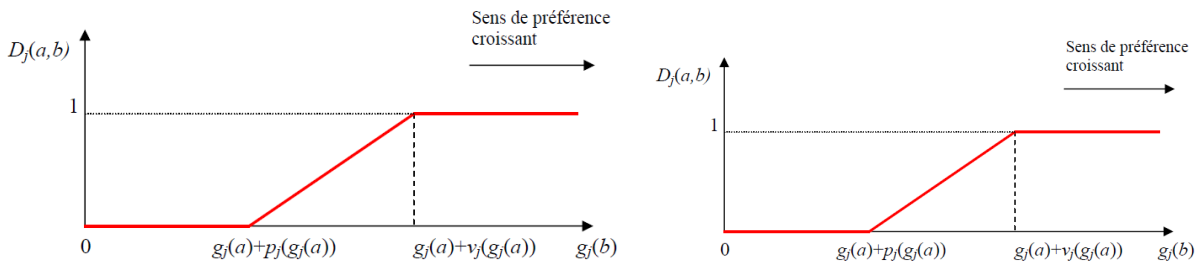


Figure 15 : Détermination de l'indice de discordance [Nafi et Werey, 2010]

→ **Calcul de l'indice de crédibilité et définition de la relation de sur-classement floue :**

$$d(a, b) = c(a, b) * \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - D_j(a, b)}{1 - c(a, b)} \quad \text{avec } \bar{F} = \{j \in F / D_j(a, b) > c(a, b)\} \quad [3.16]$$

La relation de surclassement floue est caractérisée pour chaque paire d'action (a,b) par un **degré de crédibilité** d(a,b). Ce degré de crédibilité n'est autre que l'indice de concordance C(a,b) affaibli par les indices de discordance D_j(a,b). Cependant, un indice de discordance D_j(a,b) ne contribue à l'affaiblissement de C(a,b) que s'il est suffisamment grand (c'est-à-dire si D_j(a,b) > C(a,b)). Si l'indice de discordance vaut 1 pour au moins un critère,



le degré de crédibilité est nul et ce, quelle que soit la valeur de la concordance globale et le poids du critère. Un indice de concordance globale égal à 1 implique que tous les indices de discordance sont nuls et que le degré de crédibilité vaut également 1.

→ **Évaluation des seuils de discrimination :**

Le seuil de discrimination $S(\lambda)$ a été introduit car le calcul des degrés de crédibilité, servant de base au classement, recèle une part d'arbitraire liée notamment aux interpolations linéaires. Le seuil de discrimination définit donc la limite de la différence des degrés de crédibilité à partir de laquelle un sur-classement peut être considéré comme étant effectivement plus crédible qu'un autre. L'équation utilisée dans les comparaisons est :

$S(\lambda) = \alpha - \beta\lambda$ avec $\alpha, \beta \in]0,1]$ / $\beta < \alpha$ (on peut fixer $\beta = \alpha / 2$) on a $S(\lambda) = 0,3 - 0,15\lambda$ (valeurs préconisées). Ou λ est le **niveau de coupe** $\lambda \in]0,1]$, on préconise $\lambda = \max$

$a, b \in A$ $d(a, b)$ on sélectionne les actions vérifiant la condition $d(a, b) > \lambda$. On obtient ainsi une relation de sur-classement nette notée S^λ_A définie par : $a S^\lambda_A b$ si et seulement si :

$$\left\{ \begin{array}{l} d(a, b) > \lambda \\ d(a, b) > d(b, a) + s(\lambda) \end{array} \right. \quad \text{avec } S(d(a, b)) = -0,15\lambda + 0,30 \quad [3.17]$$

→ **Évaluation des seuils de comparaison :**

L'analyse multicritère repose sur la comparaison des actions deux à deux, considérant qu'en dessous d'un certain seuil dit 'd'indifférence', les deux actions présentent des performances équivalentes et qu'au-delà d'un seuil dit 'de préférence', leurs performances diffèrent fortement. Les seuils sont définis en fonction des performances observées pour chacun des critères. À titre d'exemple, pour une incertitude de 10% et considérant un critère i :

✓ Si la différence entre deux actions est inférieure à **10% * $\max_{u,v} (g_i(u) - g_i(v))$** de la plus grande performance, les deux actions sont considérées **indifférentes**;

✓ Si la différence entre deux actions est comprise entre **10% * $\max_{u,v} (g_i(u) - g_i(v))$** et **20% * $\max_{u,v} (g_i(u) - g_i(v))$** de la plus grande performance, l'action de plus forte performance est **faiblement préférée** à l'action de plus faible performance ;

✓ Si la différence entre deux actions est supérieure à **20% * $\max_{u,v} (g_i(u) - g_i(v))$** de la plus grande performance, l'action de plus forte performance est **fortement préférée** à l'action de plus faible performance ;

✓ Enfin, un troisième seuil intervient dans l'analyse. Il s'agit du seuil de „Véto“ fixé



pour certains critères qui marque la limite de la différence entre deux évaluations au-delà de laquelle l'alternative b , moins bonne pour le critère examiné, ne peut être considéré comme meilleure que l'alternative a même si toutes les autres évaluations de la ressource sont meilleures et donc en concordance avec le sur-classement. $30\% * \max_{u,v} (g_i(u) - g_i(v))$ (valeurs par défaut)

Le LAMSADE utilise pour ces seuils des formes affines :

$$\left[\begin{array}{l} q_j(g_j(a)) = \alpha_j \cdot g_j(a) + \beta_j \\ p_j(g_j(a)) = \alpha_j \cdot g_j(a) + \beta_j \text{ avec } \alpha \in]-1; 0[\text{ si préférence croissante et } \alpha \in]0, 1[\text{ sinon} \\ v_j(g_j(a)) = \alpha_j \cdot g_j(a) + \beta_j \end{array} \right. \quad [3.18]$$

VI.2. Description de l'outil et principe de fonctionnement

L'outil proposé répond à la démarche suivante :

- **Tableau de performances** : c'est le point de départ de notre outil MATLAB-EXCEL. Il rassemble pour chaque ressource les évaluations de chaque critère. Les échelles de préférence des critères doivent être soit croissantes (valeur à maximiser) soit décroissantes (valeur à minimiser). Le tableau contient également les poids et les seuils qui seront fixés par l'utilisateur, selon le tableau 4 servant de modèle situé en *annexe 5* et contenu dans le fichier « *performances.xls* » :

- **Extraction des résultats et distillation** : les résultats obtenus sont représentés sous forme de matrice carrée M , d'ordre m , où m désigne le nombre d'alternatives. Cette matrice, disponible dans les fichiers « *result_Ascend.xls* » pour la distillation ascendante et « *result_Descend.xls* » pour la distillation descendante est interprétée dans le cas de la distillation ascendante par :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{ij} = 1 \rightarrow \text{l'alternative } i \text{ surclasse l'alternative } j \\ M_{ij} = 0 \rightarrow \text{l'alternative } i \text{ est surclassée l'alternative } j \\ M_{ij} = 0 \quad \forall i \end{array} \right. \quad [3.19]$$

Et en distillation descendante

$$\text{On a : } \left\{ \begin{array}{l} M_{ij} = 1 \rightarrow \text{l'alternative } i \text{ est surclassée l'alternative } j \\ M_{ij} = 0 \rightarrow \text{l'alternative } i \text{ surclasse l'alternative } j \\ M_{ij} = 0 \quad \forall i \end{array} \right. \quad [3.20]$$



Dans le Tableau 6 en *annexe 5* nous présentons le modèle de résultat de la distillation ascendante/descendante.

- **Rangement final** : le rangement final est la réunion des deux rangements en distillation ascendante et descendante. Dans le cas du modèle précédent, le classement est présent en *annexe 5* figure 1.

Nous remarquons dans le cas de notre exemple que les alternatives A_1, A_3 et A_4 sont au même niveau de classement. Ceci peut s'expliquer par la valeur des seuils d'indifférence relatifs aux critères. Une solution de classification plus fine dans ce cas consiste à modifier (diminuer) les valeurs des seuils d'indifférence.

L'organigramme 2 *en annexe 6* ci-après présente la logique à suivre pour la résolution de notre problème de choix à l'aide de la méthode d'agrégation ELECTRE III.

CHAPITRE IV : APPLICATION ET RESULTATS

I. Application au projet de construction d'un hôtel

I.1. Origine du projet

Le programme de construction des infrastructures au Cameroun émane de la volonté du Cameroun à atteindre l'émergence économique à l'horizon 2035 fixé par la DSCE et par cette occasion, faire du Cameroun une destination touristique de pointe. Il est élaboré sous la houlette du Ministère de l'Habitat et du Développement Urbain et a pour ambition de couvrir l'ensemble des principales villes du pays afin de faire du Cameroun le pays qui accueillera le plus des touristes en Afrique.

I.2. Description du site

Notre projet est situé en plein cœur de la ville de Yaoundé, capitale politique du Cameroun plus précisément au lieu-dit 'montée Jaco'. Il s'agit ici de la construction d'un immeuble à usage hôtelier de type 2SS + RDC + MEZZA +12 étages avec une surface au sol de 1500m².

I.3. Évaluation à l'aide de l'outil

- Définition de l'UF et de la DVT : nous allons nous intéresser au mur de séparation (de cloison) des chambres. Nous nous intéressons ici à « *1 m² de mur, de résistance thermique 2 m².K/W, de résistance acoustique 45dB et de durée de vie 50 ans* ».
- Élaboration des solutions constructives : au vu des matériaux disponibles au Cameroun et des exigences de la définition de l'unité fonctionnelle, il en ressort une élimination à priori de certaines alternatives dont les performances sont distantes de celles visées. Nous allons donc retenir les alternatives dont les évaluations relatives aux critères indexés sont voisines de celles proposées par la définition de l'UF. Il s'agit ici des quatre solutions constructives ci-après dont les évaluations sont détaillées ci-après et présentées dans le tableau de performances qui fera l'objet de l'agrégation par la suite :

Solution constructive no 1 : « *Mur en brique cuites perforées d'épaisseur 14 cm pour pose à joints minces, traité et verni* » ;




Solution constructive no 2 : « *Mur en agglos creux de béton d'épaisseur 15 cm pour pose à joints minces, revêtu et peint* » ;

Solution constructive no 3 : « Mur en béton banché (mur de COFFOR) d'épaisseur 15 cm, ferrailé et peint » ;

Solution constructive no 4 : « Mur en panneaux de bois massif (planches) double couche d'épaisseur 15 cm traité, vernis et ayant pour isolant de la paille hachée ou une laine végétale » ;

➤ Description des alternatives : le tableau suivant présente une description sommaire des alternatives retenues.

Tableau 3 : Description des alternatives

Solution constructives	Descriptions	Images descriptives
N° 1	Les briques cuites retenues sont perforées et de dimensions 10*14*29cm ³ pour pose à joint de béton de 1 cm d'épaisseur. L'aspect esthétique considérable des briques après la pose nous permet de réaliser cette alternative avec un traitement de joints avec du béton puis d'enduire le mur à l'aide d'un enduit transparent (vernis).	
N°2	Nous nous intéresserons ici aux blocs de béton creux de dimensions 15*20*40 cm ³ pour pose à joint de béton de 2 cm d'épaisseur revêtu des deux faces au béton d'épaisseur 2 cm et à la peinture à huile.	
N°3	La technologie de béton banché retenue ici est celle de COFFOR, qui repose sur des panneaux de mur porteurs. Ces murs sont ferrailés à l'aide d'un grillage en aluminium puis coffrés et coulés entre des banches. L'aspect final du mur n'est considérable qu'après revêtement et enduit des deux faces du mur.	

N°4	<p>L'essence de bois choisi à cet effet est l'iroko. Il sera traité par trempage dans du xylophène dilué au white spirit. La pose se fera à joints au lambris de bois ayant subi le même traitement et l'ensemble sera revêtu d'une couche de vernis cellulosique puis d'une couche de vernis cellulosique brillant.</p>	
-----	--	--

➤ Pondération des critères : à l'aide de l'analyse pondérée, nous obtenons les pondérations données dans le tableau 6 en *annexe 7*

Au niveau de la pondération des sous critères, le principe est le même et à la fin, le poids obtenu est ramené à la fraction de poids du critère correspondant. Le cas des sous critères du critère IE nous sera donné dans le tableau 7 en *annexe 7*

➤ Evaluation

Coût : ici, les alternatives sont évaluées selon les coûts d'acquisition des matériaux nécessaires, du matériel (ou de l'amortissement du matériel relatif à la tâche réalisée) et de la main d'œuvre mobilisée pour réaliser la solution constructive. La méthodologie d'évaluation des coûts repose sur les sous détails des prix unitaires présenté dans le tableau 8 en *annexe 8* pour le cas de la solution constructive n° 2.

Les sous détails des autres solutions constructives sont obtenus de la même manière et nous ne présentons que les résultats qui feront l'objet de l'agrégation dans le tableau récapitulatif suivant.

Tableau 4 : Évaluation du coût de construction du composant "mur"

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
Main d'œuvre	3650	2045	4222	1967
Matériel	823	542	1028	1010
Matériaux	7627	7458	8050	6843
Total	12100	10045	13300	9820

Résistance : les résistances à la compression/traction et à la flexion seront principalement concernées.

Confort : les évaluations obtenues ici concernent la résistance thermique et le taux d'affaiblissement acoustique. Les confort visuel et olfactif ne seront pas abordés du fait du manque de données afférentes.



Esthétique : en s'inspirant de la logique présentée en I.4 du chapitre précédent, nous avons pu remplir la colonne du tableau de performance relative à ce critère.

Impact environnemental : nous allons évaluer les alternatives en important les données des FDES de la base INIES selon le modèle présenté dans le tableau 9 en *Annexe 9*. Ces données seront ensuite normées et combinées en vue d'obtenir la note finale de chaque alternative selon ce critère.

Impact social : ici, la méthode d'évaluation consiste à recenser les différents ouvriers intervenant dans la production et a mise en œuvre des matériaux nécessaire pour la réalisation de notre composant.

Tableau 5 : Évaluation en impact social

Main d'œuvre Employée	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4
Manœuvres	Xx	xx	xx	Xx
Maçon	X	x	x	
Ferrailleur			x	
Menuisier/coffreux			x	Xx
Peintre			x	X
Total	3	3	6	5

Conformité : ici, les solutions constructives 1 à 3 héritent de la note 1 car des normes concernant les matériaux de ces solutions existent et la possibilité d'obtention de certificat de conformité est claire. La solution constructive 4 se verra attribuer la note 0 (ce secteur ne bénéficie pas encore de normes Camerounaise et ne sauront être déclarés conformes selon celle-ci).

Le tableau 6 en page 55 indique les performances des alternatives relatives aux critères et sous critères. Dans le cas des critères ou sous critère dont le sens d'évaluation est décroissant, un signe (-) sera affecté à chaque performance avant l'agrégation. Ceci s'explique par le fait que la distillation effectuée sera ascendante

I.4. Résultats et commentaires

Après remplissage des performances des alternatives établies dans le fichier « *performances.xls* » et exécution du fichier « *MATLAB_EXCEL_ELECTREIII.m* » selon le contexte du problème traité, nous obtenons les matrices de distillation suivantes, contenues dans les fichiers « *result_Ascend.xls* » et « *result_Desscend.xls* ».



Tableau 8 : Matrice de décision (de distillation)

Distillation ascendante					Distillation descendante				
↑	A-1	A-2	A-3	A-4	↓	A-1	A-2	A-3	A-4
A-1	0	0	0	1	A-1	0	1	0	0
A-2	1	0	1	1	A-2	0	0	0	0
A-3	0	0	0	0	A-3	0	1	0	0
A-4	0	0	0	0	A-4	1	1	0	0

A-1 A-2=0

A-1 A-3=0

A-1 A-4=1

A-2 A-1=1

A-2 A-3=1

A-2 A-4=1

A-3 A-1=0

A-3 A-2=0

A-3 A-4=0

A-4 A-1=0

A-4 A-2=0

A-4 A-3=0

A-1 A-2=0

A-1 A-3=0

A-1 A-4=1

A-2 A-1=1

A-2 A-3=1

A-2 A-4=1

A-3 A-1=0

A-3 A-2=0

A-3 A-4=0

A-4 A-1=0

A-4 A-2=0

A-4 A-3=0

• **Interprétation**

En distillation ascendante, on a:

La solution A-1 qui revient 3 fois

La solution A-2 qui revient 6 fois

La solution A-3 qui revient 2 fois

La solution A-4 qui revient 1 fois

✚ La réunion de ces 2 distillation nous montre que :

La solution A-1 a été sollicitée 6 fois

La solution A-2 a été sollicitée 12 fois

La solution A-3 a été sollicitée 4 fois

en distillation descendante , on :

La solution A-1 qui revient 3 fois

La solution A-2 qui revient 6 fois

La solution A-3 qui revient 2 fois

La solution A-4 qui revient 1 fois

La solution A-4 a été sollicitée 2 fois

À partir de ces interprétations, nous pouvons établir le graphe de surclassement ci-dessous qui donne les alternatives par ordre de préférence

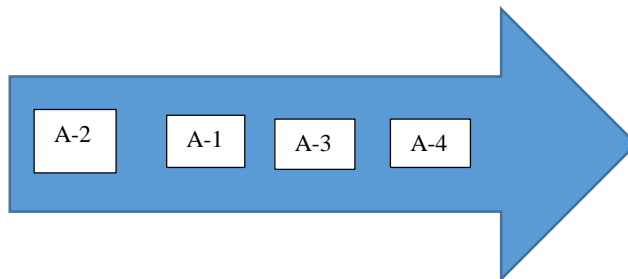


Figure 16 : graphe de surclassement

- On peut donc dire que suivant les pseudos critères retenus la meilleure alternative est d'utiliser un « *Mur en agglos creux de béton d'épaisseur 15 cm pour pose à joints minces, revêtu et peint* », suivie de l'alternative « *Mur en brique cuites perforées d'épaisseur 14 cm pour pose à joints minces, traité et verni* ».
- Remarquons que de façon intuitive, à partir de la matrice des évaluations, on n'aurait pu avoir d'idée sur la meilleure alternative, vu que la meilleure selon un critère ne l'est pas sur tous les différents critères. C'est dire que cette méthode formalise bien l'agrégation souhaitée.
- Les analyses de sensibilité ont révélé que l'action « *Mur en agglos creux de béton d'épaisseur 15 cm pour pose à joints minces, revêtu et peint* » est la plus satisfaisante suivant les critères retenus. En effet, en modifiant les poids des critères et les valeurs des différents seuils à plusieurs reprises, nous avons constaté qu'elle est restée la plus satisfaisante.

Conclusion

Cette partie avait pour objet de rendre effective la conception de l'outil d'aide au choix. Après avoir défini minutieusement tous les termes utilisés, nous avons modélisé et décrit le mode de fonctionnement de notre outil. Il ressort au final, l'application Matlab (.m) de notre outil et les fichiers Excel (.xls) nécessaires pour son fonctionnement. Son application à un contexte précis nous a permis de tirer un graphe de sur classement en distillation ascendante.



Tableau 7 : Tableau de performances des alternatives du composant "mur"

Tableau de performances																										
Critères		cr 1	cr 2				cr 3				cr 4	cr 5		cr 6								cr 7		cr 8		
		Coût	Résistance				Confort				Esthétique	Disponibilité		Imp. Environnemental								Imp. social		Conformité		
Compressio	Flexion		Eau	Feu	Acoustique	Olfactif	Thermique	Lumineux	Distance	Stock		Cons. res. E	I. ép. Ress	Cons. Eau	Prod. dech. S	C. climat	A. atm	Poll. air	Pollution de l'eau	Dest. couche ozone	Form oz	Pdt. product	Pdt mise en Œuvre			
Poids		16.70	8.88	2.22	4.44	6.66	7.76	1.94	5.82	3.88	2.80	3.67	7.33	0.54	0.76	0.47	0.34	0.15	1.21	1.06	0.91	1.51	1.36	4.59	9.3	5.60
			22.20				19.40					11.20		8.30								19.90				
Préférence		1044	--	--	0.6	4.5	--	0.13	--	0.6	7.	0.6	261	0.026	34.53	74.079	16.014	0.02	816	1.542	3 ^E .09	0.0045	0.9	0.6	0.3	
Indifférence		348	2.1	--	0.2	1.5	--	0.044	--	0.2	2.4	0.2	87	0.009	11.51	24.693	5.368	0.01	272	0.514	3 ^E .09	0.015	0.3	0.2	0.1	
veto		3306	20	--	1,9	14,3	--	0.418	--	-1.9	22.8	-1.9	827	0.083	109.3	234.586	50.996	0.07	2585	4.883	3 ^E .08	0.0143	2.85	1.19	0.9	
Alt 1		-12100	2.4	--	4	55	--	2.5	--	4	-25	3	-841.4	-0.14	-28.9	-139.93	-28.9	-6.1 ^E -02	-949	-4.09	-3.1 ^E -08	-2.3 ^E -02	1	2	1	
Alt 2		-10045	2	--	3	48	--	2.06	--	3	-5	-4	-368.27	-575 ^E -02	-82.87	-237.43	-15.67	-7.16 ^E -02	-1673.4	-7.83	-3.11 ^E -17	-6.65 ^E -0.3	1	3	3	
Alt 3		-13300	25	--	2	45	--	2.36	--	3	10	2	-423.68	-8.03 E.82	-144	-323.6	-30.4	-0.135	-3670	-8.32	-4.25 ^E -17	-7.01 ^E -03	1	5	1	
Alt 4		-9820	57	--	2	50	--	2.2	--	-4	-10	-4	-1238.82	-5.22 ^E -02	-48.18	-76.67	23.28	-6.78 ^E -02	-1874.46	-3.18	-4.59 ^E -10	-1.71 ^E -02	2	4	0	

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le présent travail avait pour objectif la mise à la disposition des acteurs de la construction un outil d'aide au choix des matériaux de construction, basé sur des études techniques, environnementales et sociales des performances des matériaux.

Après avoir présenté la typologie existante de l'habitat au Cameroun, nous avons retenu les principaux critères influençant le choix des matériaux de construction. Ensuite nous avons grâce à l'arbre de décision établi par [Lemaire, 2006] (annexe 5) effectué le choix de la méthode d'agrégation la mieux adaptée pour la résolution de notre problème (méthode multicritère d'agrégation partielle de critères à seuils ELECTRE III). La démarche proposée a permis de réaliser un programme Matlab qui importe les performances édité dans le fichier Excel défini à cet effet, calcule les matrices de concordance par critère et globale, les matrices d'indices de discordance par critère et enfin la matrice de discrimination pour produire les résultats en terme de classement des différentes actions potentielles en distillation ascendante et descendante.

L'application de notre outil d'aide au choix des matériaux de construction aux critères non commensurables au composant « mur » du bâtiment nous a conduits après définition de l'UF et de la DVT à élaborer quatre solutions constructives répondant à priori aux exigences de l'UF. À l'issue de l'agrégation selon les principes de la méthode ELECTRE III, nous avons obtenu la matrice de discrimination qui nous fournit le classement des alternatives avec en tête la solution **2** que nous retrouvons à la page 52. « *Mur en agglos creux de béton d'épaisseur 15 cm pour pose à joints minces, revêtu et peint* ». Il faut noter qu'après de multiples variations des paramètres mis en jeu, cette alternative est restée à la tête de notre classement, ce qui signifie simplement que c'est elle qui permet de réaliser le meilleur compromis entre les performances financières, mécaniques, environnementales et sociales des matériaux nécessaires pour sa mise en œuvre.

Dans l'optique d'assurer une continuité objective à ce travail, des études complémentaires à ce travail s'avèrent nécessaires, notamment :

- L'application de l'approche multicritère à l'analyse du cycle de vie des bâtiments ;
- L'élaboration des fiches de déclaration des données techniques, environnementales et sociales des produits de construction.
- L'utilisation des données environnementales des matériaux de construction du bâtiment en vue de déterminer via l'approche multicritère, la qualité environnementale des bâtiments.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A. ouvrages et articles

- [1] **Boutlikht M.** *matériaux de construction, classification et propriété*, Université de Fehrat Abbas/Setif 2001,14p
- [2] **CSTP (Centre scientifique de recherche du bâtiment).** *Directive européenne sur les produits de constructions et documents interprétatifs. Cahier du CSTB.* Paris : CSTB, 1994,202p
- [3] **CSTP,** *référentiel technique de certification « bâtiments tertiaires-démarche HQE »*,2005,7p
- [4] **Ekstrom Jonathan,** *Sanaga Gas Project Biodiversity Assessment*,2008,75p
- [5] **Emery M.,** *Management et gestion de projet : Analyse de risque*, 2003,19p
- [6] **Cours de gestion des projets**, séquences 2 gestion des risques ; par DJIM DAMBA ; (polycopié 2iE master 2, 2019) ;
- [7] **institut National de la statistique,** *Annuaire Statistique du Cameroun*, 2011,456p
- [8] **Cours d'architecture du bâtiment**, séquences 4 choix des matériaux de construction ; par TOE ; (polycopié 2iE master 2, 2019) ;
- [9] **MIPROMALO/MINRESI-CAMEROUN,** *materials science, technologies and management for sustainable development*, materials solutions, October 2009,52p
- [10] **Nafi Amir et Werey Caty,** *Aide à la décision multicritère : introduction aux méthodes d'analyse multicritère de type ELECTRE.* Gestion des services publics, université de Strasbourg, 2010, 21p
- [11] **Roy B.** *Méthodologie multicritère d'aide à la décision.* 1985, 423p
- [12] **Teno J.F,** *Etude d'impact environnementale du cycle de vie des produits de construction bilan des méthodes existantes*, **Grenoble : CSTB, 1995, 78p.**

B. Mémoires et thèses

- [13] **Lemaire Sabrina,** *Aide au choix des produits de construction sur la base de leurs performances environnementales et sanitaires.* Thèse de doctorat : INSA de Lyon, 2006,267p
- [14] **Chatagnon, N.** *Développement d'une méthode d'évaluation de la qualité environnement des bâtiments au stade de la conception.* Thèse de doctorat : Université de Savoie, 1999,344p
- [15] **Nawessi Jovial.** *Gestion optimisée des chantiers de construction basée sur les approches de décision séquentielle.* Mémoire de fin d'étude d'ingénieur de Génie Civil : ENSP-Yaoundé, 2012,100p



C. Normes, arrêtés

[16] **DSCE (Document de Stratégies pour la Croissance et l'Emploi)**, 2008,167p

[17] **ISO 9000**, *systèmes de management de la qualité-principes essentiels et vocabulaire*, 2000,38p

[18] **ISO 14042**, *Management environnemental, Analyse du cycle de vie, d'impact du cycle de vie*, Genève, 2000,17p

D. Sites internet consultés

www.construiremaison.com

www.calameo.com

ANNEXES

Annexe 1 : tableau 1 : Présentation de l'entreprise DJEMO BTP

Annexe 2 : tableau 2 : Principaux matériaux associés aux constructions au Cameroun

Annexe 3 : tableau 3 : Sens d'évaluation des critères

Annexe 4 : Organigramme1 : Arbre de décision

Annexe 5 : tableau 4 : Structure du tableau de performance

Tableau 5 : Tableau du modèle de résultat de la distillation ascendante/descendante

Figure 1 : exemple de rangement final

Annexe 6 : Organigramme2 : Méthode ELECTRE III

Annexe 7 : tableau 6 : Pondération des critères

Tableau 7 : Pondération des sous critères du critère impact environnemental

Annexe 8 : tableau 8 : Sous détail des prix de la solution constructive n° 2

Annexe 9 : tableau 9 : Fiche de performances des matériaux de remplissage

Annexe 10 : Commandes Matlab servant à l'agrégation des critères

Annexe 1

Tableau 1 : Présentation de l'entreprise DJEMO BTP

Nom ou Raison sociale	DJEMO BTP Sarl
Forme juridique	Société à responsabilité limitée SARL
Logo	
Année de création	1991
Siège social	Yaoundé – Awae escalier
Bureaux de liaison	Douala – Carrefour 02 églises Paris – 30 rue Le Peletier
Directeur Général	Clovie NOUMSI DJEMO
Ambition :	produire et vendre des maisons
Points forts	qualité, coût et délai
Mot d'ordre	tout faire pour toujours avoir le sourire du client
Devise	Travail-Qualité-Sécurité
Localisation	

Tableau 2 : Principaux matériaux associés aux constructions au Cameroun

Matériaux de fondation	Matériaux de structure	Matériaux de remplissage	Matériaux de charpente	Matériaux de couverture	Matériaux de revêtement	Matériaux de menuiserie	Matériaux de plafond
Agglos	Acier	Adobe	Acier	Aluminium	Mortier de béton + peinture	Bois	Bois
		Agglos		Paille			
BA	BA	Béton	Bambous	Raphia	Briques cuites	Métaux	Plâtre
		Blocs de terre stabilisée		Tuiles de béton			
Briques cuites	Bois	Bois	Bois	Tuiles de terre cuites	Céramiques	Verre bois	Pvc
Pierre		Briques cuites	Métaux	Zinc		Verre-métaux	
		Briques crues					

Annexe 3

Tableau 3 : Sens d'évaluation des critères

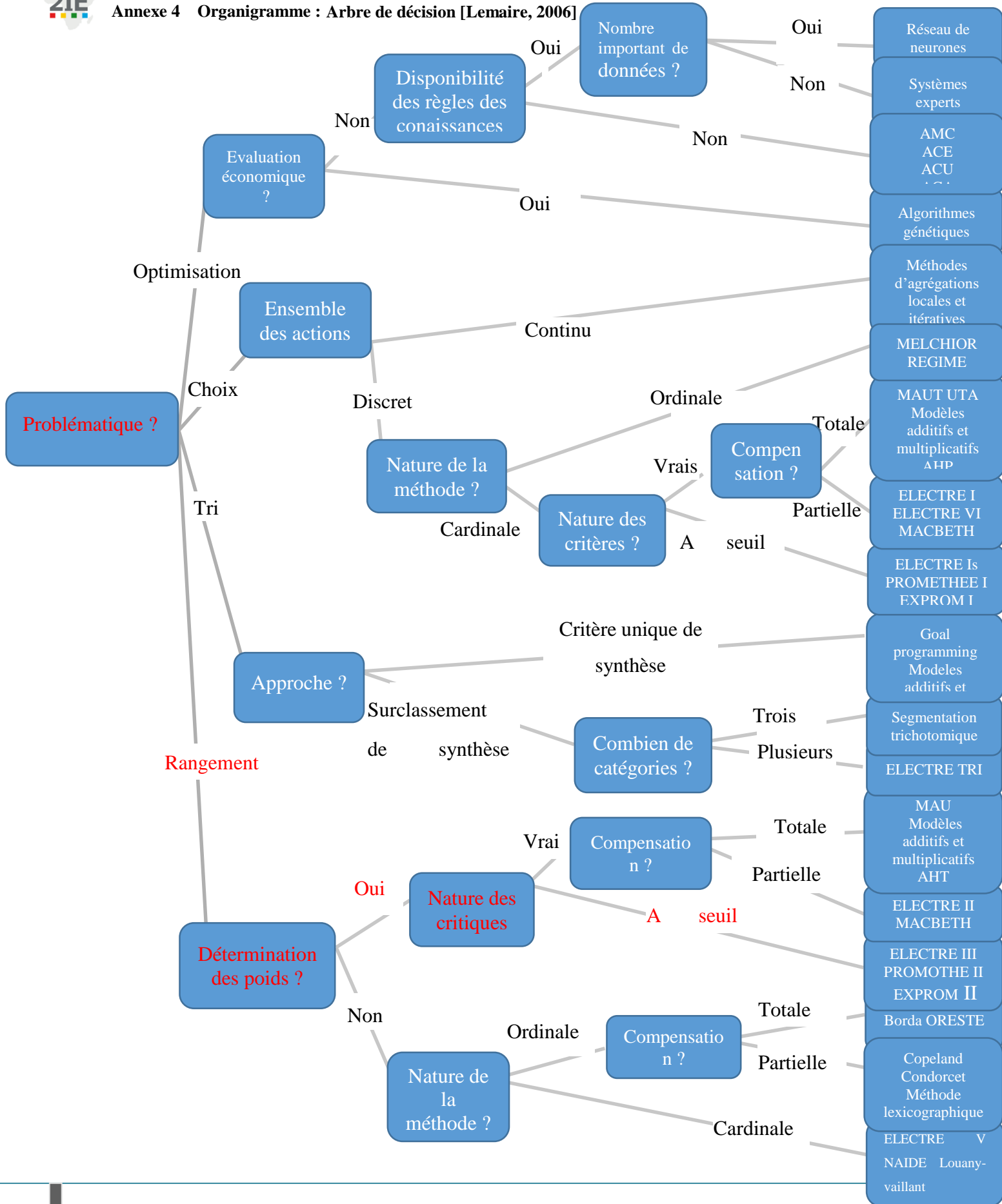
Critères	Sous-critères	Unité	Sens de préférence	Fondation	Structure	Remplissage
Cout		FCFA	↘			
Résistance	Compression	Mpa	↗			
	Flexion	MPa	↗			
	Etanchéité	%	↗			
	Feu	M	↗			
Confort	Acoustique	dB	↘			
	Olfactif		↘			
	Thermique	m ² K/W	↘			
	Lumineux	%	↘			
Esthétique			↗			
Disponibilité	Distance à la source	Km	↘			
	Etat de stock		↗			
	Consommation de ressources énergétiques	MJ	↘			
	Indicateur épuisement de ressources naturelles	Kg eq. Sb	↘			



Impact environnementale	Consommation d'eau	L	↘				
	Production de déchets solides	Kg	↘				
	Changement de climat	Kg	↘				
	Acidification atmosphérique	Kg éq.SO2	↘				
	Pollution de l'air	m3	↘				
	Pollution de l'eau	m3	↘				
	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	Kg éq. CFC	↘				
	Formation d'ozone photochimique	Kg éq. Ethylène	↘				
Impact social	Lors de la production		↗				
	Lors de la mise en œuvre		↗				
Conformité		Booléen	0	1			



Annexe 4 Organigramme : Arbre de décision [Lemaire, 2006]



Annexe 5 :

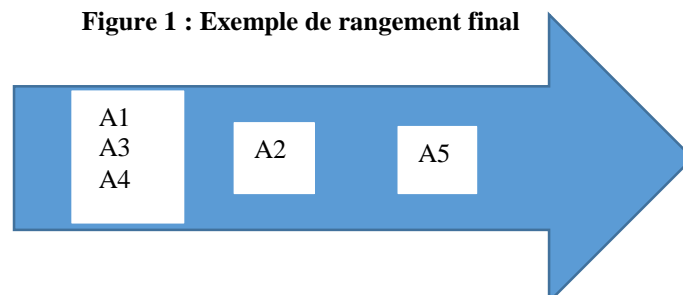
Tableau 4 : Structure du tableau de performance

Critères	cr 1	...	cr i	...	cr n
Poids	k1	...	ki	...	kn
Seuil de préférence	p1	...	pi	...	pn
Seuil d'indifférence	q1	...	qi	...	qn
Seuil de véto	v1	...	vi	...	vn
Alternatives					
Alt 1	gl(al)	...	gi(al)	...	gn(al)
...		
Alt j	gl(aj)	...	gi(aj)	...	gn(aj)
...		
Alt m	gl(am)	...	gi(am)	...	gn(am)

Tableau 5 : Tableau du modèle de résultat de la distillation ascendante / descendante

Distillation ascendante						Distillation descendante					
↑	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	↓	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
A-1	0	1	0	0	0	A-1	0	0	0	0	0
A-2	0	0	0	1	0	A-2	1	0	1	1	1
A-3	0	1	0	0	1	A-3	0	0	0	0	0
A-4	0	1	0	0	1	A-4	0	0	0	0	0
A-5	0	1	0	0	0	A-5	0	0	1	1	0

Figure 1 : Exemple de rangement final





Annexe 6

Organigramme2 : Méthode ELECTRE III

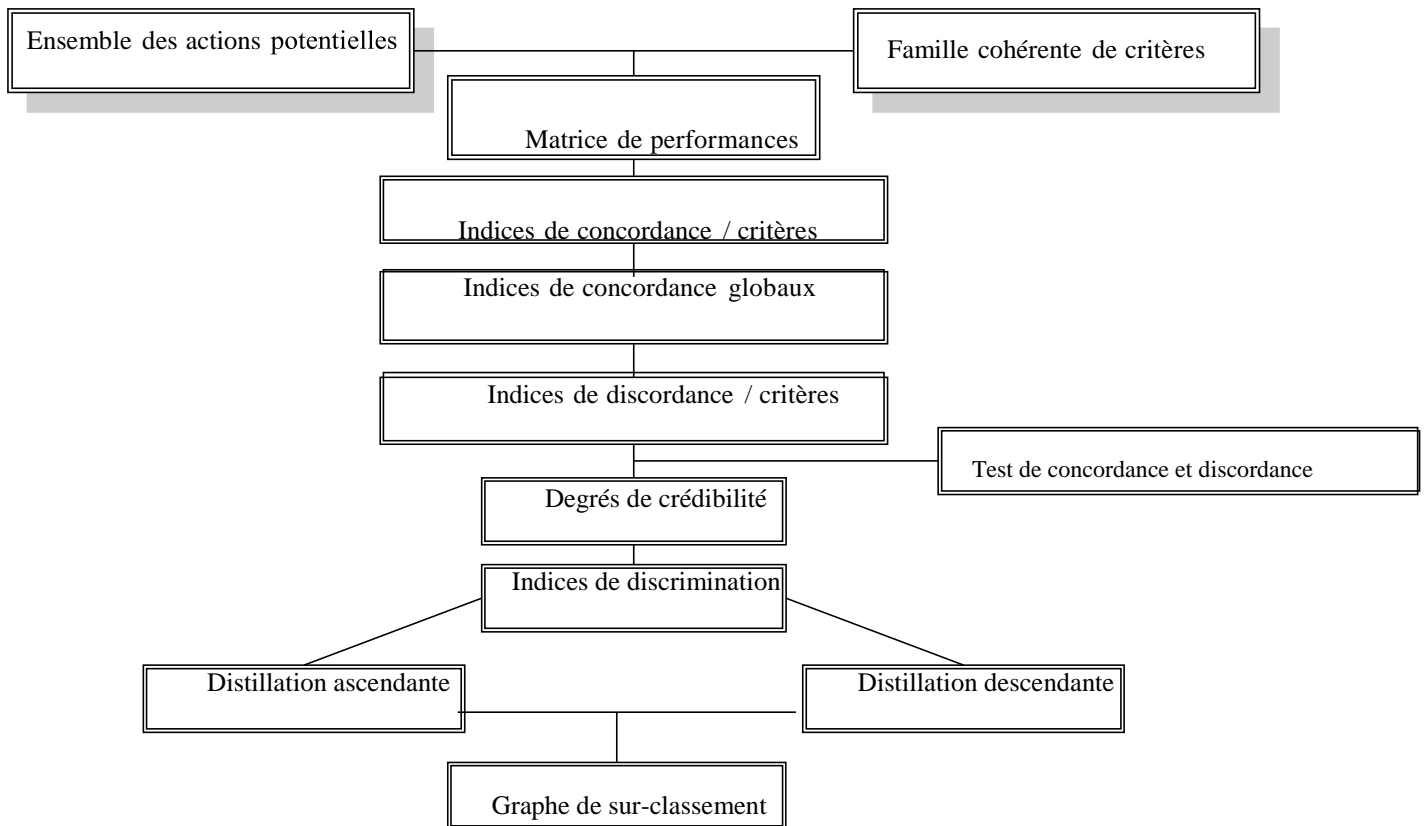


Tableau 6 : Pondération des critères



	Cout	Résistance	Confort	Esthétique	Disponibilité	Impact environnementale	Impact social	Conformité
Cout	1	1	1	0	0	0	0	0
Résistance	0	1	0	0	0	0	0	0
Confort	0	1	1	0	0	0	0	0
Esthétique	1	1	1	1	1	1	1	1
Disponibilité	1	1	1	0	1	0	1	0
Impact Environ	1	1	1	0	1	1	1	0
Impact social	1	1	1	0	0	0	1	0
Conformité	1	1	1	0	1	1	1	1
Total	6	8	7	1	4	3	5	2
Total en %	16.7	22.2	19.4	2.8	11.1	8.3	13.9	5.6

Tableau 7 : Pondération des sous critères du critère impact environnemental

	C. res.	I. ép	C. eau	P. d. Sol	C. clim	A. atm	P. air	P. eau	D. Oz.	F. Oz.
Cons. res.	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
Ind. ép	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1
Cons. eau	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
Prod. déch Sol	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Chang. cli	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Acid, atm	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Pollut. air	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
Pollut. eau	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Destr. Oz.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Form. Oz.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Total	4	5	3	2	1	8	7	6	10	9
Total en %	7.2	9	5.7	4.1	1.8	14.4	12.6	10.8	18	16.2
Total remmené a 8.3%	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	1.2	1.0	0.9	1.5	0.3

Annexe 8

Tableau 8 : Sous détail des prix de la solution constructive n° 2*

Sous détail Mur en agglos creux, revêtu et peint

			Quantité totale	Unité (m3)	
Main d'œuvre		Nombre	Jours facturés	Prix unitaire	Prix total
	Chef d'équipe	1	18	6000	108000
	Maçon	3		4000	60000
	Peintre	2		4000	40000
	Manœuvre	6		2500	37500
Total Main d'œuvre					245500
Matériel	Petit matériel maçonnerie	1	10	5000	50000
	Petit matériel peinture	1	5	3000	15000
Total Matériel					65000
Matériaux		Unité	Quantité	PU	Montant
	Agglos de 15	U	1550	250	387500
	Sable	Tonne	17,62	9500	167390
	Ciment	sac (50kg)	26,4	5000	132000
	Eau	m3	2000	5	10000
	Peinture	Pot(Pantex)	2	67000	134000
	Diluant	Pot	2	32000	64000
Total Matériaux					894890
Total (FCFA)					1205390
Prix de vente unitaire (FCFA)					10044,9167

Annexe 9

Tableau 9 : Fiche de performances des matériaux de remplissage

Matériaux						
Unité fonctionnelle : 1m ² de mur de résistance thermique 2m ² K/W, de résistance acoustique 45Db et de durée de vie 50ans						
		Alternatives				
Critères	Sous-critères	Unités	BC	Agglos	Béton	Bois
	Cout	FCFA	12100	10045	13300	9820
Résistance	Compression	MPA	5.2	2	25	57
	Flexion	MPA				
	Absorption de l'eau					
	Feu	M	A1	A2	B	B
Confort	Acoustique	dB	55	48	45	50
	Olfactif					
	Thermique	m ² K/W	2.5	2.06	2.36	2.2
	Lumineux	%				
Esthétique			4	33	3	4
Disponibilité	Etat de source	Km	25	5	10	10
	Etat de stock		Bon	Très bon	Mauvais	Bon
Impact environnementale	Consommation des ressources énergétiques	MJ	841.4	368.27	423.68	1238.82
	Indicateur épuisement des ressources naturelles	Kg eq.Sb	0.14	5.75 ^E -0.2	8.03 ^E -0.2	5.22 ^E -0.2
	Consommation d'eau	L	28.29	82.87	144	48.18
	Production de déchets solides	Kg	139.93	237.43	323.6	76.67
	Changement de climat	Kg	28.8	15.67	30.4	-23.28
	Acidification atmosphériques	Kg eq. SO ₂	6.18 ^E -0.2	7.16 ^E -02	0.135	6.78 ^E -02
	Pollution de l'air	m ³	949	1673.4	3670	1874.46
	Pollution de l'eau	m ³	4.09	7.83	8.32	3.18
	Destruction de la couche d'ozone	Kg eq CFC	3.13 ^E -08	3.11 ^E -17	4.52 ^E -17	4.59 ^E -10
	Formation d'ozone photochimique	Kg eq C ₂ H ₂	2.03 ^E -0.3	6.65 ^E -03	7.01 ^E -03	1.71 ^E -0.1
Impact social	Lors de la production		1	1	1	2
	Lors de la mise en œuvre		2	3	5	4
Conformité		Booléen	1	1	1	0

Commandes Matlab servant à l'agrégation des critères

```

1  function s_disc=MATLAB_EXCEL_ELECTREIII()
2  % realisateur: DESSU MKOUNGA Stella Sandra
3  % Agregation multicritere avec la methode ELECTREIII
4  poids=xlsread('performances.xlsx','C5:AA5');
5  n_alt=input('___Veuillez entrer le nombre d'alternatives (de préférence entre 2 et 15)');
6  performances=xlsread('performances.xlsx','C10:AA25');
7  seuils=xlsread('performances.xlsx','C7:AA9');
8  fprintf('___La matrice de performances est : ___\n');
9  disp(poids);
10 disp(seuils);
11 disp(performances);
12 choix=menu('___Quel est le type de choix?___','Monocritère','Multicritère');
13 switch choix
14     case 1
15         fprintf('Ce module est incomplet, veuillez faire un autre choix\n');
16     case 2
17         problematique=menu('___Quel est le type de problematique?___','Alpha','Beta','Gamma');
18         switch problematique
19             case 1
20                 fprintf('Ce module est incomplet, veuillez faire un autre choix\n');
21             case 2
22                 fprintf('Ce module est incomplet, veuillez faire un autre choix\n');
23             case 3
24                 dpoids=menu('___Détermination de poids?___','Oui','Non');
25                 switch dpoids
26                     case 1
27                         ncrit=menu('___Nature des criteres?___','Vrais','A seuil');
28                         switch ncrit
29                             case 1
30                                 fprintf('Ce module est incomplet, veuillez faire un autre choix\n');
31                             case 2
32                                 conc=zeros(n_alt);
33
34                                 conc_glo=zeros(n_alt);
35                                 disc=zeros(n_alt);
36                                 ind_cre=zeros(n_alt);
37                                 L=zeros(n_alt);
38                                 s_disc=zeros(n_alt);
39                                 dist=menu('___Quel est le type de distillation?___','Ascendante','Descendante');
40                                 switch dist
41                                     case 1
42                                         % EVALUATION DES INDICES DE CONCORDANCE PAR CRITERE ET GLOBAL
43                                         %conv = zeros(n_alt);
44                                         for cr =1:25
45                                             for u=1:n_alt
46                                                 for v=1:n_alt
47                                                     if ((performances(v,cr)-performances(u,cr))<=seuils(2,cr))
48                                                         conc(u,v)=1;
49                                                     elseif (performances(v,cr)-performances(u,cr)>=seuils(1,cr))
50                                                         conc(u,v)=0;
51                                                     else
52                                                         conc(u,v)=(seuils(1,cr)-performances(v,cr)+performances(u,cr))/(seuils(1,cr)-seuils(2,cr));
53                                                     end
54                                                 end
55                                             end
56                                             fprintf('___La matrice de concordance relative au critère ___');
57                                             disp(cr); fprintf(' en distillation ascendate est: ___\n');
58                                             disp(conc);
59                                             conc_glo=conc_glo+conc*poids(1,cr)/sum(poids);
60                                         end
61                                         fprintf('___La matrice de concordance globale en distillation ascendante est: ___\n');
62                                         disp(conc_glo);
63                                         % EVALUATION DES INDICES DE DISCORDANCE PAR CRITERE ET DES INDICES DE CREDIBILITE
64                                         for u=1:n_alt
65                                             for v=1:n_alt
66                                                 if ((performances(v,1)-performances(u,1))>=seuils(3,1))
67                                                     disc(u,v)=1;
68                                                 elseif (performances(v,1)-performances(u,1)<=seuils(1,1))
69                                                     disc(u,v)=0;
70                                                 else
71                                                     disc(u,v) = (-seuils(1,1)+performances(v,1)-performances(u,1))/(seuils(3,1)-seuils(1,1));
72                                                 end
73                                             if (u==v)
74                                                 L(u,v)=0;
75                                             elseif (disc(u,v)>conc_glo(u,v))
76                                                 L(u,v)=(1-disc(u,v))/(1-conc_glo(u,v));
77                                             else

```



```

77 -         L(u,v)=1;
78 -     end
79 - end
80 - end
81 - fprintf('___La matrice de discordance relative au critere 1 en distillation ascendate est: ___');
82 - disp(disc);
83 - for cr=2:25
84 -     for u=1:n_alt
85 -         for v=1:n_alt
86 -             if ((performances(v,cr)-performances(u,cr))>=seuils(3,cr))
87 -                 disc(u,v)=1;
88 -             elseif((performances(v,cr)-performances(u,cr))<=seuils(1,cr))
89 -                 disc(u,v)=0;
90 -             else
91 -                 disc(u,v)=(-seuils(1,cr)+performances(v,cr)-performances(u,cr))/(seuils(3,cr)-seuils(1,cr));
92 -             end
93 -             if(u==v)
94 -                 L(u,v)=0*L(u,v);
95 -             elseif(disc(u,v)>conc_glo(u,v))
96 -                 L(u,v)=(1-disc(u,v)/(1-conc_glo(u,v)))*L(u,v);
97 -             else
98 -                 L(u,v)=1*L(u,v);
99 -             end
100 -         end
101 -     end
102 -     fprintf('___La matrice de discordance relative au critere');
103 -     disp(cr);fprintf('en distillation ascendate est:___\n');
104 -     disp(disc);
105 - end
106 - for u=1:n_alt
107 -     for v=1:n_alt
108 -         ind_cre(u,v)=conc_glo(u,v)*L(u,v);
109 -     end
110 - end
111 - fprintf('___La matrice d"indice de credibilité en distillation ascendate est: ___\n');
112 - disp(ind_cre);
113 - %EVALUATION DES SEUILS DE DISCRIMINATION
114 - for u=1:n_alt
115 -     for v=1:n_alt

```

```

116 -         lamda=max(ind_cre(u,v),ind_cre(v,u));
117 -         s_lamda=-0.15*lamda+0.3;
118 -         if (ind_cre(u,v)>ind_cre(v,u)+s_lamda)
119 -             s_disc(u,v)=1;
120 -         else
121 -             s_disc(u,v)=0;
122 -         end
123 -     end
124 - end
125 - fprintf('___La matrice d"indices de discrimination en distillation ascendate est: ___\n');
126 - disp(s_disc);
127 - xlswrite('result ascend',s_disc,'B2:P16');
128 - case 2
129 - % EVALUATION DES INDICES DE CORDANCE PAR CRITERE ET GLOBAL
130 - for cr=1:25
131 -     for u=1:n_alt
132 -         for v=1:n_alt
133 -             if ((performances(v,cr)-performances(u,cr))<=-seuils(1,cr))
134 -                 conc(u,v)=0;
135 -             elseif((performances(v,cr)-performances(u,cr))>=seuils(2,cr))
136 -                 conc(u,v)=1;
137 -             else
138 -                 conc(u,v)=(seuils(1,cr)+performances(v,cr)-performances(u,cr))/(seuils(1,cr)-seuils(2,cr));
139 -             end
140 -         end
141 -     end
142 -     fprintf('___La matrice de discordance relative au critere');
143 -     disp(cr);fprintf('en distillation ascendate est:___\n');
144 -     disp(conc);
145 -     conc_glo=conc_glo+conc*poids(1,cr)/sum(poids);
146 - end
147 - fprintf('___La matrice de concordance globale en distillation descendate est: ___\n');
148 - disp(conc_glo);
149 - % EVALUATION DES INDICES DE DISCORDANCE PAR CRITERE ET DES INDICES DE CREDIBILITE
150 - for u=1:n_alt
151 -     for v=1:n_alt
152 -         if ((performances(v,1)-performances(u,1))>=-seuils(1,1))
153 -             disc(u,v)=0;
154 -         elseif((performances(v,1)-performances(u,1))<=-seuils(3,1))

```




```

155 -         disc(u,v)=1;
156 -     else
157 -         disc(u,v) = (-seuils(1,1) -performances(v,1) +performances(u,1)) / (seuils(3,1) -seuils
158 -     end
159 -     if (u==v)
160 -         L(u,v)=0;
161 -     elseif (disc(u,v) >conc_glo(u,v))
162 -         L(u,v) = (1-disc(u,v)) / (1-conc_glo(u,v));
163 -     else
164 -         L(u,v)=1;
165 -     end
166 - end
167 - end
168 - fprintf('___La matrice de disconcordance relative au critere 1 en distillation descendante es
169 - disp(disc);
170 - for cr=2:25
171 -     for u=1:n_alt
172 -         for v=1:n_alt
173 -             if ((performances(v,cr) -performances(u,cr)) >=-seuils(1,cr))
174 -                 disc(u,v)=0;
175 -             elseif ((performances(v,cr) -performances(u,cr)) <=-seuils(3,cr))
176 -                 disc(u,v)=1;
177 -             else
178 -                 disc(u,v) = (-seuils(1,cr) -performances(v,cr) +performances(u,cr)) / (seuils(3,cr)
179 -             end
180 -             if (u==v)
181 -                 L(u,v)=0*L(u,v);
182 -             elseif (disc(u,v) >conc_glo(u,v))
183 -                 L(u,v) = ((1-disc(u,v)) / (1-conc_glo(u,v))) *L(u,v);
184 -             else
185 -                 L(u,v)=1*L(u,v);
186 -             end
187 -         end
188 -     end
189 -     fprintf('___La matrice de disconcordance relative au critere');
190 -     disp(cr); fprintf('en distillation descendante est:___\n');
191 -     disp(disc);
192 - end
193 - for u=1:n_alt

```

```

194 -         for v=1:n_alt
195 -             ind_cre(u,v) =conc_glo(u,v) *L(u,v);
196 -         end
197 -     end
198 -     fprintf('___La matrice d"indices de discrimination en distillation descendante est:___\n');
199 -     disp(ind_cre);
200 - %EVALUATION DES SEUILS DE DISCRIMINATION
201 -     for u=1:n_alt
202 -         for v=1:n_alt
203 -             lamda=max(ind_cre(u,v), ind_cre(v,u));
204 -             s_lamda=-0.15*lamda+0.3;
205 -             if (ind_cre(u,v) >ind_cre(v,u) +s_lamda)
206 -                 s_disc(u,v)=1;
207 -             else
208 -                 s_disc(u,v)=0;
209 -             end
210 -         end
211 -     end
212 -     fprintf('___La matrice d"indices de discrimination en distillation descendante est:___\n');
213 -     disp(s_disc);
214 -     xlswrite('result descend',s_disc,'E2:P16');
215 -     otherwise
216 -         fprintf('veuillez faire un choix valide\n');
217 -     end
218 -         otherwise
219 -             fprintf('veuillez faire un choix valide\n');
220 -         end
221 -     case 2
222 -         fprintf('veuillez faire un choix valide\n');
223 -     otherwise
224 -         fprintf('veuillez faire un choix valide\n');
225 -     end
226 -     otherwise
227 -         fprintf('veuillez faire un choix valide\n');
228 -     end
229 -     otherwise
230 -         fprintf('veuillez faire un choix valide\n');
231 - end
232 - end

```

