

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : d'Architecture.....
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المعمارية
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de
Magister en : Architecture

Option : Architecture, Formes, Ambiances et Développement Durable

**Approches multicritères en conception bioclimatique
et optimisation par le biais d'un langage architecturale**

Présenté par :

Gaouas Oussama

Soutenu publiquement le

Devant le jury composé de :

Pr. ZEMMOURI Nourddine
Pr. MAZOUZ Said
Dr. BELAKEHAL Azzedine
Dr. BENABBES Mossadek

Professeur
Professeur
Professeur
Maitre de conférence

Président
Directeur de mémoire
Examineur
Examineur

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra

*A mes très chers parents,
A mes chères sœurs Imen et Româissa
A la mémoire de mes grands-mères et grands-pères.*

Remerciements

Mes remerciements et ma reconnaissance vont particulièrement à mon directeur de mémoire Pr. Said Mazouz pour sa modestie, sa disponibilité, et surtout ses précieuses orientations et son suivi continu et rigoureux durant cette recherche.

Je présente mes remerciements aux membres du jury de soutenance ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation en graduation et en post-graduation.

Je remercie également toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce modeste travail, particulièrement mon ami Mhaya Chafik.

Et à tous mes collègues de la post graduation promotion 2009/2010.

Summary:

This academic dissertation is based on the assumption that architectural design in general and bioclimatic design in particular relies on the evaluation and integration of all the different design criteria either qualitative or quantitative. These criteria are often quite complicated to cope with and may be conflicting. This makes it cumbersome to achieve a rational design and assess the overall “goodness” of a proposed design solution. Therefore, it is important to have a method that can assist the designer to choose an architectural solution that will turn into a building that presents a good performance related to those criteria. In order to specify an approach that would fit into the building design process, a survey of multi-criteria methods was carried out. This latter resulted in the conclusion that “simple additive weighting” approach appeared to be most suitable. This method assists the architect in the choice of the best architectural solution and makes it possible to lead to a building which presents a good performance on the criteria considered.

This work presents an architectural conception aiding method to be used in the initial phase of a building design. It is based on a multicriteria analysis method for the ranking of the project alternatives. The considered criteria were: the thermal comfort; the visual comfort; the amount of natural light; the solar exposure and the energy consumption. The performances of each project solution related to these criteria were obtained by means of simulation. The softwares used in the research are Ecotect © and Radiance ©. The differences between the architectural solutions are given by some building parameters generally available during the sketch phase, like building orientation, windows sizes and the type of air conditioning. The application of the method is based on general rules of behavior derived from the simulated performances of the building.

An example of the method application is presented. The architectural typology considered was a primary school. The simulations were carried out considering the hot arid climate conditions of Biskra. Both the simulation results and some tendency rules describing the building behaviors are shown, in the form of curves and graphs.

Finally a ranking of project solutions was carried out using SAW method and the best solutions were indentified.

Résumé :

Ce mémoire est fondé sur l'idée que la conception bioclimatique en particulier et la conception architecturale en général se fonde sur l'évaluation et l'intégration de tous les différents critères de conception qu'ils soient qualitatifs ou quantitatifs. Ces critères sont souvent compliqués et contradictoires. Ceci rend difficile, pour un architecte, d'opter pour une conception rationnelle et évaluer la « qualité » globale d'une solution de conception proposée. Donc, il est important de disposer d'une méthode qui puisse assister le concepteur dans le choix d'une solution architecturale permettant d'aboutir à un bâtiment qui présente une bonne performance sur les critères considérés. Afin de spécifier une approche qui s'insérerait au mieux dans le processus de conception, un état de l'art des méthodes multicritères a été effectué. La méthode SAW a semblé être la plus appropriée. Cette méthode aide l'architecte dans le choix d'une solution architecturale et permet d'aider à concevoir un bâtiment qui présente une bonne performance sur les critères considérés.

Ce travail présente une méthode d'aide à la conception architecturale pouvant être utilisée dans la phase initiale de la conception des bâtiments. Pour son développement, nous nous sommes basés sur la méthode de l'analyse multicritère pour le classement des alternatives de projet. Les critères considérés ont été : le confort thermique ; le confort visuel ; la quantité de lumière naturelle ; l'ensoleillement et la consommation énergétique. Les performances des solutions de projet concernant ces critères ont été obtenues à travers des simulations, en utilisant pour cela les logiciels Ecotect© et Radiance©. Les différentes alternatives architecturales sur lesquelles les choix vont se porter seront en relation avec l'orientation du projet, la dimension des fenêtres et le type de climatisation du local étudié, qu'il faut définir au cours de l'avant-projet.

Nous présentons un exemple d'application de la méthode dans lequel est considérée comme typologie architecturale, une école primaire. Les simulations ont été réalisées en considérant les conditions du climat chaud et aride de la ville de Biskra. Les résultats des simulations et les règles de tendance obtenues (qui décrivent les comportements de l'école) sont montrées sous forme de courbes et de graphes.

Enfin un tri des solutions de projet a été effectué en employant la méthode SAW et les meilleures solutions architecturales ont été identifiées.

ملخص

بني هذا البحث على تقييم وإدماج مختلف العوامل والخصائص الكمية والكيفية التي يعتمدها التصميم المعماري عامة والبيوموناخي بصفة خاصة. عادة ما تكون تلك العوامل معقدة، مترابطة ومتناقضة. وهذا ما يزيد من صعوبة وتعقيد عملية الوصول إلى الحل المعماري الأمثل. يهدف هذا العمل إلى طرح بدائل في متناول المهندس المعماري لتمكنه من فهم وتحقيق الخاصية الشمولية للتصميم المعماري. بهدف إيجاد مقاربة تناسب التصميم المعماري ، كان لزاما علينا التطرق إلى مختلف الطرق التي تأخذ بعين الإعتبار مختلف العوامل. وقد مكنتنا هذه النبذة من إستعمال طريقة تسمى طريقة SAW، تناسب خصائص التصميم المعماري وتساعد المهندس في اختياره للحل الأمثل أخذا بالاعتبار العوامل التالية: الرفاهية الحرارية، المرئية، كمية الضوء الطبيعي، التشميس وكمية الطاقة المستهلكة. مكنتنا المحاكاة التي أنجزناها بالاستعانة بالبرنامجين ECOTECT، و RADIANCE من معرفة أداء المشاريع المعمارية بالنسبة للعوامل المذكورة سلفا. تحصلنا على مختلف المشاريع المعمارية انطلاقا من تغيير توجيه المشروع، أبعاد النوافذ، ونمط التكيف المعتمد داخل المبنى المدروس. يجب تحديد هذه الأخيرة خلال المراحل الأولى من التصميم المعماري. طبقنا منهجية الدراسة على مدرسة ابتدائية في مدينة بسكرة التي تتميز بمناخها الحار والجاف. قمنا بعرض نتائج المحاكاة عن طريق تمثيلات بيانية ثم رتبنا جملة هذه الحلول ترتيبا تنازليا من الأحسن إلى الأسوء باستعمال طريقة .SAW

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Approche analytique de la conception architecturale	9
I.1 Introduction.....	9
I.2 Approche exploratoire de la conception	9
I.2.1 Définition de la conception « design »	9
I.2.2 Caractéristiques des problèmes de conception.....	11
I.2.3 Caractéristiques des solutions de conception.....	13
I.2.4 Caractéristiques de la conception elle-même	14
I.2.5 Idée de conception	16
I.2.6 la conception à travers le dessin	17
I.2.6.1 Le rôle du dessin	18
I.3 Etat de l'art des méthodes de conception	21
I.3.1 Les différentes classifications des méthodes de conception.....	22
I.3.2 Etat de l'art des méthodes de conception	27
I.3.2.1 les méthodes de la première génération.....	28
I.3.2.2 Critique générale des méthodes de la première génération	40
I.3.2.3 La deuxième génération des méthodes de conception	42
I.3.2.3-A Méthodes systémiques	47
I.3.2.5 Critiques des méthodes de la deuxième génération	51
I.3.2.6 Vers une nouvelle génération des méthodes qui combinent entre la première génération (paradigme de résolution de problème) et la deuxième génération (réflexion dans l'action)	51
I.4 Conclusion.....	54
Chapitre II : Conception bioclimatique	56
II.1 Introduction.....	56
II.2 définition	56
II.3 Climats et paramètres climatiques	58
II.3.1 Définition	58
II.3.2 Echelle du climat	59
II.3.3 Paramètres climatiques	61
II.3.3.1 Température de l'air	62
II.3.3.2 Le vent	63
II.3.3.3 Humidité de l'air	64
II.3.3.4 Précipitations	65
II.3.3.5 Rayonnement solaire	65
II.3.4 Classification et types des climats	67
II.3.4.1 La classification basée sur la végétation	67
II.3.4.2 La classification géo-climatique	68
II.3.4.3 Classification pour conception architecturale	69
II.3.4.4 Classification du climat en Algérie	71

II.4. les paramètres qui se rapportent à la conception architecturale	73
II.4.1 La localisation du bâtiment.....	73
II.4.2 La forme et l'orientation du bâtiment	73
II.4.3. L'orientation	75
II.4.4 La masse thermique	77
II.4.5 Fenêtrage «fenestration »	77
II.4.6. L'isolation thermique	79
II.4.7. La ventilation naturelle	81
II.4.8. Le refroidissement passif	82
II.5 Conclusion	83
Chapitre III : Méthodes systémiques en conception bioclimatique	84
III.1 Introduction	84
III.2 Les méthodes systématiques	84
III.2.1 La méthode d'Olgyay ...	85
III.2.2 Diagramme bioclimatique de B. Givoni	86
III.2.3 La méthode de Szokolay.....	90
III.2.4 Les tables de Mahoney	92
III.2.5 La méthode de Koenigsberger, Mahoney and Evans	94
III.2.6 La méthode de Koenigsberger et al. Dite de « forward analysis ».....	94
III.2.7 La méthode graphique « the confort triangles »	97
III.3 Processus de conception intégrée « Integrated Design Process ».....	98
III.3.1 Définition	98
III.3.2 Le concept du bâtiment intégré (Integrated Building Concept « IBC »)	99
III.3.3 L'avantage du processus de la conception intégrée	101
III.3.4 L'interaction des paramètres dans IDP	103
III.3.5 L'équipe du projet.....	104
III.3.6 Modèle de développement de processus de conception	104
III.3.6.1 Les éléments structurants.....	104
III.3.6.2 Le processus	106
III.4 Conclusion	107
Chapitre IV: Approches multicritères.....	109
IV.1. Introduction	109
IV.2. La philosophie de MCDM	109
IV.2.1. Définition de la prise de décision multicritères	109
IV.2.2. Histoire des approches multicritères	110
IV.2.3. Objectifs et caractéristique du MCDM	112
IV.2.4. Les avantages du MCDM	114
IV.2.5 Les inconvénients du MCDM.....	115
IV.2.6 Les problématiques du MCDM	116
IV.2.7 Les étapes du processus MCDM	118
IV.2.7.1 Génération des alternatives (solutions ou options)	118
IV.2.7.2 Identification des objectifs et de critères	129
IV.3 Classification des méthodes multicritères	124
IV.4 Les différentes méthodes MDCM	128

Sommaire.

IV.4.1 Aggregate value function approaches (USA).....	128
IV.4.1 .1 SMART (Simple Multi-Attribute Rating Theory).....	128
IV.4.1 .2 SAW: Simple additive weighting.....	129
IV.4.1 .3 The analytical hierarchy process (AHP).....	130
IV.4.2 Les méthodes de surclassement (France).....	131
IV.4.2.1 PROMETHEE (Preference Ranking Organisations Method for Enrichment Evaluations).....	131
IV.4.2.2 les méthodes ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité)	134
IV.4.2.2.1 méthode ELECTRE III	135
IV.4.3 Discussion	137
IV.5 Attribution des valeurs de performance	140
IV.6 La normalisation.....	143
IV.7 La Pondération « Weighting »	144
IV.7 .1 Les méthodes de rangements : « Ranking Methods ».....	144
IV.7 .2 Les méthode de Rating	145
IV.7 .3 Les poids d'oscillation « Swing weights »	145
IV.7 .3 L'analyse des compromis « Trade-off Analysis Method ».....	146
IV.7 .4 La méthode de comparaison par paire « pair-wise comparaison ».....	146
IV.8 Conclusion	146
Chapitre V : Modèle de l'analyse	148
V.1 Introduction	148
V.2 La géométrie (cas d'étude).....	149
V.2 .1 Propriété physique de l'école.....	149
V.2 .1.1 Analyse typologique	150
V.2 .1.2 Le modèle du bloc retenu	150
V.3 Simulation.....	151
V.3 .1 Conditions climatique et usage de l'école	151
V.3 .2 Objectifs des Simulations	152
V.3 .3 Génération des alternatives.....	153
V.3.4 Les indicateurs de performances.....	154
V.3.4.1 Critère consommation énergétique du bloc	155
V.3.4.2 Critère inconfort thermique des élèves	155
V.3.4.3 Critère quantité de lumière naturelle dans les salles de classes.....	155
V.3.4.4 Critère confort visuel des élève	156
V.3.4.5 L'ensoleillement à l'intérieure des salles de classes.....	157
V.3.5 Détermination des graphes de performances.....	158
V.4 Application de l'Analyse Multicritère	160
V.5 Conclusion	165
Chapitre VI : Résultats de simulations et application de la méthode multicritère	166
VI.1 Introduction.....	166
VI.2 Lumière Naturelle (Eclairage)	167
VI.2.1 (21Mai)	167

Sommaire.

VI.2.2 (21Decembre)	169
VI.2.3 (21Mars)	171
VI.3 Confort visuel (Uniformité d'éclairement)	173
VI.3.1 (21Mai)	173
VI.3.2 (21 Décembre)	175
VI.3.3 (21 Mars)	177
VI.4 Consommation énergétique.....	179
VI.4.1 (21 Mai)	179
VI.4.2 (21 Mars)	181
VI.4.3 (21 Décembre)	183
VI.5 L'inconfort thermique (PPD).....	185
VI.5.1 21 mai	185
VI.5.2 (21 Mars).....	187
VI.5.3 (21 Décembre)	188
VI.6 L'exposition au soleil	190
VI.6.1 (21 Décembre).....	190
VI.6.2 (21 Mai)	192
VI.6.3 (21 Mars.....	194
VI.7 Application de l'approche multicritère: (Saw method)	195
VI.8 Conclusion	203
Conclusion générale	204
Bibliographie	211
Annexe 1.....	222
Annexe 2.....	223

Table des illustrations

Chapitre I : Approche analytique de la conception architecturale	
Figure 1.1 Un problème multicritère dans la conception d'une fenêtre. Source: Lawson, B. (2005).....	13
Figure 1.2 Chronologie de la présence des idées dans le processus de conception. Source : Scaletsky (2003).	17
Figure 1.3 Typologie des modèles de conception d'après Blessing (1994). Source : Clarkson, J. et Eckert, C (2005).....	26
Figure 1.4 La méthode de Jones (1963). Source: Jones, J. (1970)	30
Figure 1.5 L'arbre de la théorie des graphes. Source : Alexander (1971). Réadapté par autour.....	33
Figure 1.6 Le modèle d'Archer (1963 ,1964). Source: Hugh (2004).....	35
Figure 1.7 IDEF0 modified (IDEF0v). Source: Pedrini, A (2003).....	38
Figure 1.8 le modèle de Gordon Best (1967). Source: Chupin, J. P (2011).....	38
Figure 1.9 Le model de Foreman (1967). Source: Hugh (2004).....	39
Figure 1.10 Le model de Marcus (1969) et Maver (1979). Source: Pedrini, A (2003).....	39
Figure 1.11 La méthode du générateur primaire de Jane Darke. Source: Lawson, B. (2005).....	43
Figure 1.12 Le modèle de Mazouz et Zerouala. Source : Mazouz et Zerouala (2001).....	45
Figure 1. Le modèle PDI de raisonnement dans la conception (March, 1984). Source : Clarkson, J. et Eckert, C (2005).....	46
Figure 1.14 Le modèle en spirale de Zeisel (1981). Republié en 2006. Source: Chupin, J. P (2011).....	47
Figure 1.15 Les phases de la conception systématique (Pahl & Beitz 1990). Source: Haapasalo, Harri (.2000).....	48
Figure 1.16 La boucle de conception. Source: Haapasalo, Harri (2000).....	49
Figure 1.17 Contenus des salles dans la maison de la qualité (Akao 1990, Ekdahl 1997). Source: Haapasalo, Harri. (2000).....	50
Figure 1.18 Application de QFD à la conception architecturale et au projet de construction (Ekdahl 1997, Lakka et autres 1995, Turunen 1992). Source: Haapasalo, Harri (2000).....	51
Figure 1.19 processus de l'information dans le model de Géro. Source : Dehlinger, J et Dehlinger, H (2009)	53
Figure 1.20 les différentes transformations dans le modèle de Géro. Source : Laaroussi, A (2007).....	53
Figure 1.21 Reformulation 1 : Transformer S en S' est basé sur la situation. Source : Laaroussi, A (2007).	53
Figure 1.22 Reformulation 2 : Transformer les comportements attendus est fonction de la situation qui existe en termes de la structure synthétisée jusque là et les capacités discriminatoires des comportements existants. Source : Laaroussi, A (2007).....	54
Figure 1.23 Reformulation 3 : Redéfinir les fonctions ou les buts de l'objet est dépendant de la situation. Source : Laaroussi, A (2007).....	54
Chapitre II : Conception bioclimatique	
Figure 2.1 les trois éléments de l'architecture bioclimatique . Source : Wikipédia, 2011.....	57
Figure 2.2 les différentes classifications des échelles climatiques d'après Hupfer (1991). Source : Thomas. F (2008).....	60
Figure 2.3 le système climatique dans l'échèle macro, méso et micro d'après Hupfer (1991). Source : Thomas. F (2008).....	60
Figure 2.4 Température mensuelles à Berlin. Source : Alain, L et André D. H, (2005).....	63
Figure 2.5 Un diagramme de fréquence de vent, « rose du vent ». Source : Hans. R (2000).....	64
Figure 2.6 La moyenne DJF du taux de précipitation. Source: Haigh J. D. et al. (2004).....	65
Figure 2.7 Le budget du rayonnement solaire de la terre. Source: Claudio V. F (2008).....	66
Figure 2.8 Les trois composantes du rayonnement global. Source : Alain Liebard et André De Herde (2005).	66
Figure 2.9 La classification de Köppen. Peel M. C. et al (2007). Source: http://www.wmo.int	68
Figure 2.10 Carte des climats de monde (Rosali Mignon ; 1998). Source : Zeroual. D (2006).....	69
Figure 2.11 les quatre climats proposés par Akinston (1953). Source: Szokolay, (2008).....	70

Table des illustrations.

Figure 2.12 Les zones climatiques d'Algérie (<i>Recommandations Architecturales</i> , ENAG Edition, Alger.) Source : Mokhtari et al (2008) ;	72
Figure 2.13 Analyse énergétique des formes de base de la construction. Source: Michael. B et al (2010).	74
Figure 2.14 Les différentes formes dans des régions climatiques différentes (Olgyay, 1992, p.89). Source: Biro. T (2003).	75
Figure 2.15 Zonage bioclimatique pour les différents espaces d'une maison. Source: Thierry. S (2000)	76
Figure 2.16 Effet de la masse sur la température. Source : Hyde, (2008).	78
Figure 2.17 Effet de cheminée. Source : L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (2008).	82
Figure 2.18 Effet de vent sur la ventilation naturelle. Source : L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (2008).	82

Chapitre III : Méthodes systémiques en conception bioclimatique

Figure 3.1 processus conventionnel de la conception architecturale. Source : Evans (2007).	84
Figure 3.2 Le diagramme bioclimatique d'Olgyay. Source: Olgyay (1962).	86
Figure 3.3 Diagramme de Givoni. réadapté par autour. Source :Çacri (2006).	87
Figure 3.4 Givoni-Milne bioclimatic chart © 1981 (1981 ref. Diamond et al. 1993). Source: Sopa. V and Jeff. S (2004).	89
Figure 2.5 Diagramme bioclimatique de Givoni pour les pays développés(1992). Source : Lomas et al (2004)	90
Figure 3.6 Diagramme psychrométrique de S. Szokolay. Source : Szokolay. S et Auliciems. A (2007).	91
Figure 3.7 le potentiel de chaque phase de conception en termes d'économie d'énergie et le coût (Koenigsberger, Mahoney and Evans ,1970) readapté par autour. Source : Evans (2007).	95
Figure 3.8 Les triangles de confort, avec des stratégies de conception ajoutées Evans (2003). Source : Evans (2007).	98
Figure 3.9 Le concept du bâtiment intégré. Source : Heiselberg, P., et al.(2006).	100
Figure 3.10 Les variables influençant la performance énergétique du bâtiments à performance élevée. Source : Los Alamos National Laboratory Sustainable Design Guide (2002).	102
Figure 3.11 Efficacité des décisions prises dans différentes étapes de la vie de bâtiments. Source : Heiselberg, P (2007).	102
Figure 3.12 Exemple d'organisation de l'équipe de la conception intégrée. Source : Heiselberg. P (2007)	104
Figure 3.13 la superposition des éléments structuraux reflète leur interdépendance et leurs corrélations. Source : Löhnert, G., Dalkowski, A., Sutter, W. (2003).	105
Figure 3.14 Les boucles d'itération pendant le processus de conception. Source : Heiselberg. P (2007).	106
Figure 3.15 L'intégration dans le processus de conception . Source : Larsson, N. and Poel, B. (2003).	107

Chapitre IV: Approches multicritères

Figure 4.1 Problématique de choix	117
Figure 4.2 Problématique de tri	117
Figure 4.3 Problématique de rangement.....	118
Figure 4.4 Les seuils d'indifférence et de préférence.....	121
Figure 4.5 Exemples d'outils pour organiser les informations. Source : Andresen (2000).....	122
Figure 4.6 Les approches de définition de critères. source : Fernandez (2010).....	123
Figure 4.7 La décomposition hiérarchique d'un problème à AHP. Source : Yung. Y (2009).....	130
Figure 4.8 Les critères généralisés pour la méthodes PROMETHEE .Source : Moeffaert (2002).	131
Figure 4.9 La représentation graphique des deux écoulements. Source: Brans and Mareschal (1990, p. 227) Cité par Omann (2004).	134
Figure 4.10 Indexe de concordance et de discordance . Source: Roulet. C et al. (2002).....	136
Figure 4.11 l'arbre de décision. Source: Roulet. C et al (2002).....	136
Figure 4.13 Les échelles de mesures	140
Figure 4.13 l'échelle de 5-points	141

Chapitre V : du modèle de l'analyse

Table des illustrations.

Figure 5.1 méthodologie d'approche suivie.....	148
Figure 5.2 la disposition des blocs et le mur de clôture (les écoles stéréotypées). Source : ben chikh (2006)	149
Figure 5.3 Plan du bloc. Source : Auteur.....	150
Figure 5.4. Modèle 3D du bloc. Source : Auteur.....	151
Figure 5.5. Les points considères pour le calcul de l'éclairément au niveau du plan de travail. Source: Auteur.....	156
Figure 5.6. Les ratios d'uniformité au niveau du plan de travail. Source: Auteur.....	157
Figure 5.7. Les points considères pour le calcul de l'ensoleillement au niveau du plan de travail. Source: Auteur.....	158
Figure 5.8. Deux solution architecturales (alternative) du bloc. Source : Auteur.....	161
Figure 5.9. La matrice de comparaison. Source : Auteur.....	162
Figure 5.10. Démarche générale de notre approche. Source : Auteur.....	164

Chapitre VI : Résultats de simulations et application de la méthode multicritère

Figure 6.1 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairément au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mai. Source : Auteur.....	167
Figure 6.2 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairément au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de la taille des fenêtre durant le 21 Mai. Source : Auteur.....	167
Figure 6.3 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairément au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Décembre. Source : Auteur.....	169
Figure 6.4 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairément au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Décembre. Source : Auteur.....	170
Figure 6.5 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairément au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur.....	171
Figure 6.6 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairément au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur.....	172
Figure 6.7 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mai. Source : Auteur.....	173
Figure 6.8 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de la taille des ouvertures durant le 21 Mai. Source : Auteur.....	174
Figure 6.9 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Décembre. Source : Auteur.....	175
Figure 6.10 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de la taille des ouvertures durant le 21 Décembre. Source : Auteur.....	176
Figure 6.11 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur.....	177
Figure 6.12 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de la taille des ouvertures durant le 21 Mars. Source : Auteur.....	178
Figure 6.13 Consommation énergétique du bloc en fonction de son orientation (21 mai). Source : Auteur.....	179
Figure 6.14 Consommation énergétique du bloc en fonction de la taille de la fenêtre (21 mai). Source : Auteur.....	180
Figure 6.15 Consommation énergétique du bloc en fonction de son orientation (21 Mars). Source : Auteur.....	181
Figure 6.16 Consommation énergétique du bloc en fonction de la taille de la fenêtre (21 Mars). Source : Auteur.....	182

Table des illustrations.

Figure 6.17 Consommation énergétique du bloc en fonction de son orientation (21 Décembre). Source : Auteur.....	183
Figure 6.18 Consommation énergétique du bloc en fonction de la taille de la fenêtre (21 décembre). Source : Auteur.....	184
Figure 6.19 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mai. Source : Auteur.....	185
Figure 6.20 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de la taille des fenêtres durant le 21 Mai. Source : Auteur.....	186
Figure 6.21 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur.....	187
Figure 6.22 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de la taille des fenêtres durant le 21 Mars. Source : Auteur.....	188
Figure 6.23 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Décembre Source : Auteur.....	189
Figure 6.24 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de la taille des fenêtres durant le 21 Décembre. Source : Auteur.....	190
Figure 6.25 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'ensoleillement > 0 en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Décembre. Source : Auteur	191
Figure 6.26 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'ensoleillement > 0 en fonction de la taille de la fenêtre du bloc durant le 21 Décembre. Source : Auteur	192
Figure 6.27 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'ensoleillement > 0 en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mai. Source : Auteur.....	192
Figure 6.28 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'ensoleillement > 0 en fonction de la taille de la fenêtre du bloc durant le 21 Mai. Source : Auteur.....	193
Figure 6.29 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'ensoleillement > 0 en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur.....	194
Figure 6.30 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'ensoleillement > 0 en fonction de la taille de la fenêtre du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur.....	195

Liste des tableaux

Chapitre I : Approche analytique de la conception architecturale

Tableau 1.1 Les deux paradigmes de conception d'après Dorst (1997). Source: Reymen, Isabelle M.M.J. (2001).....	25
Tableau 1.2 la méthode de George Polya (1945). Source : Hugh (2004). Réadapté par autour).....	28
Tableau 1.3 Les trois situations de conception selon Alexandre. Réadapté par Autour Source: Hugh (2004).....	32
Tableau 1.4 RIBA plan of work. Réadapté par auteur Source : Morbitzer, C, A. (2003).....	37

Chapitre II : Conception bioclimatique

Tableau 2.1 Le système d'Akinston, réadapté par autour. Source: Olu Ola, O et Bogda P. O (2002).....	71
Tableau 2.2 Classification du climat. Réadapté par auteur. Source : Evans (2007).....	72
Tableau 2.3 Les fonction d'une fenêtre. Source : Gay. J (2001).....	78
Tableau 3.4 Surface du vitrage selon l'orientation. Source: Andy. L (2009).....	79
Tableau 3.5 Le niveau d'isolation requis. Source: Hyde (2008).....	80

Chapitre II : Méthodes systémiques en conception bioclimatique

Tableau 3.1 Indicateurs définis dans les Tableaux de Mahoney.(Koenigsberger et al, 1974.) Source : Evans (2007).....	93
Tableau 3.2 la méthode de Koenigsberger, Mahoney and Evans (1970) réadapté par autour. Source : Evans (2007).....	94
Tableau 3.3 stratégies de conceptions pour les différents climats. Réadapté par auteur Source: Evans (2007)	96
Tableau 3.4 Catégories et paramètres pour la classification des concepts de l'énergie et de l'environnement. Source : Heiselberg et al. (2006).....	100
Tableau 3.5 Exemple des interactions entre les paramètres dans le processus de la conception intégré dans la phase d'esquisse d'une façade. Source : Hansen. H et Knudstrup (2005).....;	103

Chapitre IV: Approches multicritères.

Tableau 4.1 Comparaison de MODM et MADM. Source: Hwang, C. L. and Yoon, K. (1981).....	127
Tableau 4.3 Les caractéristiques des versions ELECTRE	134
Tableau 4.4 L'échelle de Kirk et Spreckelmeyer. Source: Andresen (2000).....	143

Chapitre V : Construction du modèle de l'analyse

Tableau 5.1 Détermination des indicateurs de performance . Source : Auteur.....	160
Tableau 5.2 Les critères pris en considération dans notre recherche.....	160
Tableau 5.3 Résultats de simulation pour les différentes solutions architecturales.....	161
Tableau 5.4 Echelle de comparaison de Saaty. Source : Saaty (1980).....	161
Tableau 5.5 Random index. Source : Saaty (1980).....	163

Chapitre VI : Résultats de simulations et application de la méthode multicritère

Tableau 6.1 les critères considérés. Source : Auteur.....	195
Tableau 6.2 Echelle de Saaty (1980).....	196

Liste des tableaux.

Tableau 6.3 La matrice de comparaison binaire : source : Auteur	196
Tableau 6.4 Le calcul des poids des critères. Source : Auteur.....	196
Tableau 6.5 matrice de la somme pondérée: Auteur.....	196
Tableau 6.6 vecteur de cohérence. Source : Auteur.....	197
Tableau 6.7 les valeurs des solutions architecturales pour les trois jours. Source : Auteur.....	198
Tableau 6.8 La matrice de décision (S× N). Source : Auteur.....	199
Tableau 6.9 La matrice de décision normalisée. Source : Auteur	201
Tableau 6.10 11Résultats finaux des solutions architecturales avec leurs classements. Source : Auteur	202

INTRODUCTION GENERALE

L'architecture a connu plusieurs mutations à travers le temps et l'espace. Chaque époque a marqué son passage par des productions architecturales spécifiques. Chaque civilisation a développé une architecture qui reflétait sa langue et ses coutumes ou folklore. Pour des milliers d'années, l'être humain a développé des concepts architecturaux pour fournir le confort acceptable dans un environnement spécifique, tenant compte des conditions climatiques locales, des matériaux de construction disponibles, aussi bien que des aspects culturels et religieux. De la hutte primitive à la maison d'aujourd'hui, l'architecture reflète à travers son évolution les différentes solutions trouvées par l'homme pour faire face aux aléas climatiques.

Il est souvent admis dans les milieux scientifiques que l'acte de bâtir est intimement lié à celui de se protéger du climat surtout défavorable et l'architecture vernaculaire et traditionnelle a donné des réponses très judicieuses. L'architecture vernaculaire, qui peut être considérée comme un contrat durable et naturel entre l'homme et la nature, est le fruit de l'imagination, des années d'évolution et des conditions climatiques¹. Certains chercheurs, parmi eux Olgyay, montrent que cette protection dite adaptation a toujours été présente surtout dans l'architecture vernaculaire et traditionnelle². Certes, il existe peu ou pas de préoccupation esthétique dans l'architecture traditionnelle. Cependant, nous découvrons une démarche, un équilibre, un style et le plus important une harmonie qui règne entre l'homme, son environnement et sa culture. « *L'architecture traditionnelle participe à une transformation naturelle du milieu. Elle offre à l'architecte qui veut bien y être sensible une leçon de modestie.* »³

L'architecture vernaculaire s'est bornée aux matériaux et aux techniques locales disponibles à un moment donné. Le transport était limité, ce qui a réduit l'utilisation des matières premières importées. Ceci a mené aux concepts constructifs qui ont tenu compte non seulement du confort des occupants mais également des ressources locales et des incidences sur l'environnement de l'usage de la construction. L'architecture vernaculaire a pu fournir beaucoup de concepts pour maintenir des conditions confortables tout en concrétisant un équilibre avec l'environnement comme illustré avec les exemples suivants.

¹ Fathy. H, Construire avec le peuple, Sindbad ed. Paris, 1970

² Olgyay.V, Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism. Princeton University Press, Princeton ,1963.

³ Donnadiou. C et al, habiter le désert : les maisons mozabites, pierre mardaga éditeur, 1986.

Il n'était pas concevable chez les Égyptiens antiques de percer le toit et les murs épais des temples. Pour résoudre le problème, de petites fentes ont été percées à la jonction du toit plat et du mur de temple. En raison de leur taille et endroit, ces fentes ont faiblement allumé la partie supérieure des murs. Dans les petits temples ou logements, où le toit était fin des petites ouvertures étaient percées à travers la toit-terrasse, pour améliorer la lumière du jour et la ventilation. Plus tard ils ont trouvé une manière d'améliorer l'efficacité de ces ouvertures en tirant profit de la différence de niveau entre les toits-terrasses.

Les Mésopotamiens sont à l'origine des concepts architecturaux tels que la voûte. Pour éviter la surchauffe, ils ont couvert des toits d'environ 1 mètre de terre. Mais la charge sur le toit a réduit la portée, parce que les palmiers ont été employés pour la structure. Par conséquent, les maisons étaient étroites et longues, ce qui a compliqué leur ventilation naturelle. Ainsi, le confort des occupants était directement lié à la structure. L'évolution du concept de toit-terrasse a mené aux jardins suspendus célèbres de Babylone. Ils étaient situés près des puits, desquels un système astucieux faisait monter l'eau au toit pour l'irrigation. L'évaporation de l'eau a réduit la température ambiante et la couverture de toit a réduit la surchauffe à l'intérieure de l'espace (Var, 1964)⁴.

Les Grecs et les Romains ont connu en effet depuis longtemps l'importance d'une bonne orientation pour l'utilisation d'un bâtiment. Dans son célèbre traité *De architectura*, Vitruve pose une des premières pierres de la tradition de l'architecture et de l'urbanisme. Il explique en détail l'influence du soleil sur les différentes fonctions urbaines lorsqu'il dit « *S'agit-il de construire une ville? La première chose à faire est de choisir un endroit sain. Il doit être élevé, à l'abri des brouillards et du givre, situé sous la douce température d'un ciel pur, sans avoir à souffrir ni d'une trop grande chaleur ni d'un trop grand froid. [...]* »⁵ Avec sa maçonnerie de pierres grossièrement taillées et sa toiture recouverte d'herbe, la Blackhouse (ou Maison noire) - une habitation archaïque située sur l'archipel Écossais des Hébrides - se fond dans un paysage rude et sans arbre. Elle est en toute logique construite avec des matériaux disponibles sur place.

Dans tous les exemples fournis par l'architecture vernaculaire on se rend compte qu'ils partagent une caractéristique commune qui est la prise en compte des apports et contraintes de l'environnement et cela ne fait que renforcer l'harmonie entre l'architecture et son contexte qu'il l'abrite. Cela se traduit par le bien-être accru des utilisateurs et par la bonne

⁴ Citherlet, S, "Towards the Holistic Assessment of Building Performance Based on an Integrated Simulation Approach", PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), 2001.

⁵ Roberto, G et Karl J. H, Architecture et efficacité énergétique, principes de conception et de construction, Birkhauser Verlag AG, Berlin, Allemagne, 2008.

résistance des constructions aux sollicitations extérieures. L'organisation de l'espace se fera tant en fonction du soleil et de la lumière, de l'exposition aux vents dominants ou thermiques saisonniers, de la topographie du terrain...etc.

Cependant L'architecture du vingtième siècle, dite « internationale » se caractérisera (au moins du côté historique) par une importance exagérée accordée à la technologie, à l'exclusion de toute autre valeur. De là cette dépendance actuelle envers le contrôle mécanique de l'ambiance intérieure, au détriment d'une exploitation des phénomènes climatiques et des autres phénomènes naturels pour la satisfaction de nos exigences de confort. L'architecture s'internationalise en même temps qu'elle s'affadit et le confort n'est pas toujours atteint⁶.

Aujourd'hui encore, par la faute de l'aspect international de cette architecture, on prête peu attention à la diversité et au caractère particulier des climats et des solutions de conception régionales. Par conséquent, L'architecture est devenue un objet décontextualisé, autrement dit, la société, la nature et la science (architecture) ont été séparés, de sorte que la théorie architecturale n'ait aucun raccordement ou soit séparée du contexte de son endroit (Bauman et Briggs, 2003)⁷. Plus précocement la décontextualisation remonte à l'invention du climatiseur, qui a permis à des personnes de construire sans prêter l'attention à l'environnement local.

La plupart des architectes du mouvement moderne n'ont pas montré un intérêt pour les effets du climat en prenant en compte peu de paramètres pour une insertion correcte du climat dans le processus de la conception ce qui a conduit à une architecture dite « simpliste » ou « atomiste »⁸ qui s'oppose à la nature holiste de la conception architecturale. Ces derniers vocables sont avancés pour désigner la manière dont les architectes ont pris en compte les facteurs physiques de l'environnement dans leurs projets. A titre d'exemple si l'on se réfère au célèbre dessin du Corbusier désignant la journée solaire de 24 heures comme étant la clé de l'architecture et de l'urbanisme, et si on lui superpose le temps réel d'occupation du logement, on s'aperçoit que certaines pièces parmi les plus utilisées, hors du week-end, entre le lever et le coucher du soleil, et qui pourraient donc entretenir un rapport privilégié avec la lumière et le climat, sont celles que l'on relègue au cœur du bâtiment où elles sont réduites à une stricte fonctionnalité, définitivement inaptes à offrir un cadre plaisant aux activités qui s'y déroulent.

⁶ Pierre. L, Architecture climatique, ÉDUSUD, Aix-en-Provence, 1994

⁷ Magarian. D, "Building with the desert: place conscious architecture at burning man", Master of Liberal Studies, Northern Arizona University, August 2007.

⁸ Mazouz. S, Eléments de conception architecturale, Alger: Edition O.P.U, Juillet, 2004.

Bien qu'à ce moment-là, il n'y avait aucune norme qui a favorisé l'approche holistique et la prise en compte des éléments de l'environnement physique. Néanmoins, il y a quelques exemples des architectes et chercheurs qui ont tenté d'intégrer des exigences fonctionnelles et les paramètres du climat. En 1963 le terme bioclimatique a été employé pour la première fois par Victor Olgyay. Il a développé le diagramme bioclimatique, qui rapporte des données climatiques aux limites de confort thermique, pour identifier des stratégies de conception⁹. L'architecture bioclimatique « *cette expression vise principalement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière naturelle c'est à dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables, les effets pervers sur le milieu naturel et les coûts d'investissement et de fonctionnement. L'intérêt du bioclimatique va donc du plaisir d'habiter ou d'utiliser un espace à l'économie de la construction, ce qui en fait un élément fondamental de l'art de l'architecture.* »¹⁰

Un autre exemple illustrant l'intégration des éléments de l'environnement physique est la maison solaire de Frank Lloyd Wright. La maison solaire hémicyclique est un exemple phare d'une telle application de l'approche holiste pendant la conception du bâtiment. Frank Lloyd Wright a conçu cette maison de deux étages en 1944 à Wisconsin aux Etats-Unis. Les aspects distinctifs de la conception de cette maison sont sa forme en lettre C et une façade entièrement vitrée orientée vers sud. Frank Lloyd Wright est l'un des premiers qui a mis en question cette transition de l'architecture en stipulant que « *l'architecture qui était vraiment une architecture a procédé à partir de la terre et que le terrain... la nature des matériaux, et le but du bâtiment, doivent déterminer inévitablement la forme et le caractère de n'importe quel bon bâtiment* » (Wright, 1939 ; 1)¹¹. Le célèbre architecte mathématicien Christopher Alexander dans son livre intitulé : « *de la synthèse de la forme*¹² » a essayé d'aborder l'adaptation de la forme architecturale avec son contexte. Pour lui la conception de la forme est déterminée par le contexte dans lequel elle devrait être insérée en arguant que chaque problème de conception commence par un effort de réaliser l'adaptation " fitness" entre deux entités : la forme en question et son contexte. Il a ajouté que « *la forme est la solution au problème ; le contexte définit le problème.* »

⁹ Olgyay. V, Design with climate bioclimatic approach to architecture regionalism. New Jersey, Princeton University, 1973.

¹⁰ Chatelet. A et al, Architecture climatique : une contribution au développement durable. Tome2 : concepts et dispositifs, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998.P10

¹¹ Magarian. D, "Building with the desert: place conscious architecture at burning man", Master of Liberal Studies, Northern Arizona University, August 2007.

¹² Alexander. C, De la synthèse de la forme, Dunod, Paris, 1971

Le parcours de la recherche en matière de conception architecturale des bâtiments est marqué par l'absence de normes et règles visant l'orientation des concepteurs à une bonne maîtrise des paramètres contradictoires du processus de conception. Cependant, les chercheurs et les architectes ont toujours donné des observations et recommandations à ce propos.

« La crise énergétique » des années soixante dix (70) a déclenché des axes de recherche et une prise de conscience mondiale. Cet état de transition de perspective, a poussé à remettre en question les régimes de notre mode de vie et d'habitat créés dans l'euphorie de la fièvre spéculatrice, du standard importé, du rendement, amenant l'uniformité, la dépersonnalisation, le gaspillage et finalement la perte d'identité¹³.

Malgré le changement d'attitudes après la crise pétrolière de 1973, l'architecture climatique a été longtemps vue comme une caricature appelée «architecture solaire» exprimée par des capteurs à 45° d'inclinaison, la façade sud vitrée et la façade nord hermétiquement fermée. Cette simplification extrême s'est traduite par un regrettable refus généralisé des architectes de considérer les facteurs climatiques lors de la conception du projet de manière plus pertinente. Des méthodes anciennes sont encore utilisées, pratiquement sans modifications, depuis leur introduction. A l'heure où nous parlons de développement durable, des techniques sont utilisées sans tenir compte des possibilités naturelles du site et, souvent, pour générer la forme architecturale. L'architecte face à sa table de dessin est devant trois possibilités : soit il propose des solutions découlant de son propre expérience de façon intuitive, soit il teste une solution au hasard parmi un catalogue de solutions, ou bien il ne fait rien. Malgré le fait que l'on sait que le projet est toujours un compromis entre plusieurs critères conflictuels, on voit rarement des tentatives pour appliquer des méthodes d'aide à la décision au moment du projet. Ce qui nous permet de poser la question : **pourquoi les architectes ont du mal à intégrer les paramètres climatiques dans le processus de la conception architecturale ? Et pour quelle raison ils ont tendance à traiter ces paramètres conflictuels séparément, souvent sans référence à la totalité et le caractère holiste du projet d'architecture ?**

Cet état de fait est du à l'absence d'une alternative qui puisse contribuer à l'amélioration du processus de conception en tenant compte de critère multiples simultanément et la prise en compte en amont de ces éléments devrait être pour le praticien un réflexe naturel tel le

¹³ Silvio. G et Ulrich. D, Architecture vernaculaire, presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse, 1990.

skieur qui «négocie» les obstacles avec plus ou moins de dextérité. Nous recherchons une méthode qui sache tenir compte de plusieurs critères sans les réduire à un seul.

L'hypothèse principale sur laquelle nous avons basé notre recherche est que, à partir de la connaissance de phénomènes qui interagissent dans une construction : Le confort thermique, la disponibilité de lumière naturelle, le confort lumineux, l'ensoleillement et la consommation énergétique, d'une méthode d'évaluation de données (étude paramétrique), de techniques de simulation, il est possible d'appliquer une méthode multicritère; un outil pour une conception rationnelle des bâtiments où les données climatologiques et environnementales pourraient s'intégrer naturellement dans la démarche du projet.

Les procédures permettant de formaliser la recherche, dans les lignes générales, ont suivi les étapes principales :

Une introduction générale : qui comporte les éléments de la problématique à savoir : l'hypothèse de la recherche, les objectifs de la recherche, la démarche suivie ainsi que la structure du mémoire.

Le premier chapitre : traite les caractéristiques des problèmes de conception, les solutions de conception, le processus de conception-lui-même et le rôle de l'outil dans ce processus ainsi que un état de l'art des méthodes de conception

Le deuxième chapitre : est consacré à l'état de l'art des méthodes de conception systémique qui ont tenté d'intégrer la composante climatique dans le processus de conception architecturale ainsi que les recherches et les méthodes récentes du processus de conception intégrée.

Le troisième chapitre : traite les différents éléments qui se rapportent à la conception bioclimatique et la notion du climat à travers sa définition, ses variables, ses échelles et ses types.

Le quatrième chapitre : traite la philosophie des approches multicritères qui nous permettra de comprendre leurs caractéristiques, un état de l'art des différentes approches multicritères ainsi que les différentes échelles de mesures, les techniques de pondération et de normalisation.

Le cinquième chapitre : traite la méthodologie d'approche suivie avec la présentation du cas d'étude.

Le sixième chapitre : est consacré aux résultats de simulations et leurs interprétations et l'application de la méthode multicritère.

Une conclusion générale : qui comporte les synthèses tirées des différents chapitres ainsi que les recommandations pour une meilleure conception intégrée qui prend au mieux le caractère holiste de la conception architecturale, les limites de la recherche et les futures perspectives.

L'objectif principal de ce travail est de développer une méthode pour la prise de décision multicritères en conception bioclimatique qui sera un moyen de réaliser une conception plus intégrée en tirant le meilleur parti des conditions naturelles, pour obtenir une ambiance confortable en termes thermiques et lumineux, d'ensoleillement, et économique sur le plan énergétique. Plus spécifiquement, en considérant quelques critères que sont: le confort thermique, le confort visuel, la disponibilité de lumière naturelle, l'ensoleillement et la consommation énergétique.

La méthode devrait aider l'équipe de conception et le client (maître d'ouvrage) à trouver la voie la plus efficace dans la myriade de différentes stratégies de conception bioclimatique tout en prenant soin de plusieurs différents objectifs de conception. Les phases de conception initiales ou primaires d'un projet architectural sont particulièrement importantes. Les facteurs principaux qui déterminent l'efficacité du projet architectural en ce qui concerne le climat et l'environnement sont déterminés dans les phases de l'analyse et de l'esquisse ; par exemple, l'orientation, le zonage bioclimatique, la disposition des façades...etc. L'accent serait mis sur les phases initiales de la conception architecturale dans cette méthode. Cependant, la méthode devrait également être appliquée à des étapes tardives de conception.

La méthodologie devrait principalement être un moyen d'aider la communication entre les différents membres de l'équipe de conception, et entre l'équipe de conception et le client. Cependant, la méthode peut également être orientée vers les autres dépositaires du projet, par exemple de futurs occupants, les organismes gouvernementaux, ...etc., au moins afin de documenter des décisions. Puisque l'architecte, le leader et le chef de l'orchestre de l'équipe de conception, est responsable de l'intégration des avis individuels des différents membres de l'équipe de conception, la responsabilité d'appliquer la méthode dans le processus de conception appartiendrait naturellement à lui.

L'utilisation de cette méthode multicritère en conception bioclimatique pour les conditions climatique de Biskra aide à l'émergence de bâtiments meilleurs. L'approche permet aux architectes d'avoir une vue équilibrée et totaliste du travail de conception et les empêcher d'aller loin pour la recherche de solutions architecturales atomistes et simplistes.

Je me rends compte qu'il reste beaucoup de chemin à faire afin de réaliser une conception totaliste où tous les critères sont pris en considération. Je ne crois pas que ce mémoire résoudra le problème entier. Cependant, j'espère que la méthode aille changer les méthodes anciennes simplistes de conception architecturale.

Chapitre un

Approche analytique de la conception architecturale

I.1 Introduction :

Pour mieux aborder les approches multicritères en conception bioclimatique, il est tout d'abord important de comprendre le processus de la conception lui-même tant qu'à ce stade des choix décisifs sont pris et qui vont influencer le comportement du bâtiment. Dans le présent chapitre nous abordons tout d'abord une approche théorique de la conception architecturale qui nous permettra de comprendre les caractéristiques des problèmes de la conception, les solutions de la conception, le processus de la conception lui-même ainsi que le rôle de l'outil dans ce processus. Puis, nous exposerons un état de l'art des différentes approches qui traitent la conception et finalement nous présenterons un état de l'art des méthodes de conception.

I.2 Approche exploratoire de la conception :

I.2.1 Définition de la conception « design » :

Le processus de conception en anglais est défini par le verbe design, qui n'a pas de traduction directe en français. « *Concevoir (to design), c'est dessiner, exprimer un dessein par un dessin ou par une forme ou par un système de symboles (...) c'est créer, ou construire, quelque modèle symbolique à l'aide duquel on inférera ensuite le réel.* »¹ (Demailly & Lemoigne, 1986).

Les définitions les plus connues de la conception sont données dans l'ouvrage de Christopher Jones « *Design Methods : Seeds of Human Future* »² :

- trouver les vrais composants physiques de la structure physique (Alexander, 1963)
- la prise de décision dans le contexte d'incertitude avec des risques élevés pour l'erreur. (Asimov, 1962)
- la simulation de ce que nous voulons faire avant de faire. (Booker, 1964)
- « Engineering design » est l'utilisation des principes scientifiques, des informations techniques et de l'imagination dans la définition d'une structure mécanique, une

¹ Bonnardel, N, « Activités de conception et créativité : de l'analyse des facteurs cognitifs à l'assistance aux activités de conception créatives », Presses Universitaires de France, Volume 72, 2009.

² Jones, J, Design Methods: Seeds of Human Futures, Wiley-Interscience, London, UK, 1970.

machine ou un système pour exécuter des fonctions prédéfinies avec une économie et une efficacité maximales. (Feilden, 1963)

- une activité créatrice, autrement dit, produire une chose nouvelle et utile qui n'a pas existé auparavant. (Reswick, 1965)
- le saut d'imagination à partir des faits présents pour les possibilités futures. (Page, 1966)
- la solution optimale pour des besoins réels d'un ensemble de circonstances particulières. (Matchett, 1968).

Ces définitions données par nombreux de théoriciens de la conception diffèrent les unes des autres principalement du fait que les concepteurs définissent la conception sur la base de leurs expériences et le domaine de la conception (mécanique, architecturale...etc.) auquel ils appartiennent.

Ces définitions avaient été critiquées sévèrement du fait que personne n'a mentionné le mot dessin (plans, coupes, perspectives, croquis...etc.), qui est l'action commune de toute sorte de conception. En outre, elles ne se réfèrent pas au produit de la conception mais seulement à ses ingrédients, « *si nous cherchons une base plus solide pour nos pensées, nous ferions mieux de regarder à l'extérieur du processus lui-même et essayer de définir la conception par ses produits.* »³

Lawson (2005) a donné une définition plus large. Pour lui le mot « design » se rapporte au produit résultant du processus de conception ou au processus de conception lui-même⁴. Elle est également une activité intentionnelle, contraignante, décisionnelle, exploratoire et pédagogique (Gero, 1996), aussi bien une opération non-déterministe qui produit une nouveauté formelle (Knight et Stiny, 2001)⁵.

Il est à noter que parmi les définitions ci-dessus, y a celles qui mettent l'accent sur une discipline spécifique de conception, celles qui sont générales et d'autres qui évoquent certaines caractéristiques du processus de conception lui-même. Deux types principaux de définitions peuvent être distingués : « la conception est ... » et « la conception en tant que ... ». La conception est l'activité de transformation de l'état du produit en cours de conception ou du processus de conception en un autre état pour atteindre l'objectif de conception. Le concepteur peut effectuer cette activité en produisant une représentation du

³ Jones, J, *Design Methods: Seeds of Human Futures*, Wiley-Interscience, London, UK, 1970.

⁴ Lawson, B, *How designers think*, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.

⁵ Hassoun, K, *L'abduction en conception architectural : Une sémiologie hypostatique*, Thèse de doctorat, Faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels, Université Laval, Québec 2010.

produit en cours de conception ou du processus de conception ou en changeant le processus de conception lui-même⁶.

I.2.2 Caractéristiques des problèmes de conception :

Le problème est un phénomène objectivable, une réalité extérieure et indépendante. Poser un problème consiste donc à connaître objectivement cette réalité. Il apparaît nécessaire de présenter les caractéristiques de problème de conception.

L'une des caractéristiques majeures des problèmes de conception est d'être mal-définis, mal-structurés et vicieux « wicked * »⁷. « Wickedness » consiste en la redéfinition continue du problème pendant la période de sa résolution et l'impossibilité d'examiner la validité des solutions (Coyne 2005)⁸. La différence entre les problèmes mal et bien définis est une différence de degré sur un continuum⁹. Le problème est mal-défini s'il ne satisfait pas un certain nombre de conditions spécifiques. Pour la conception architecturale les conditions non remplies sont¹⁰ :

- un critère défini et un processus automatisable pour tester toute proposition de solution ;
- un ou plusieurs espaces du problème pour représenter les états atteints, visés ou envisageables au cours de la résolution ;
- un ou plusieurs espaces du problème pour représenter toute connaissance que l'on peut acquérir sur le problème ;
- la possibilité de définir avec une totale exactitude les changements dans le monde que l'artéfact peut amener.

Par ailleurs, pour Kitchener (1983) les problèmes bien définis sont ceux ayant des solutions absolument correctes et connaissables. Par contre, les problèmes mal-définis sont ceux pour lesquels il y a des évidences et des options conflictuelles qui peuvent mener à des solutions différentes¹¹.

⁶ Reymen. I, Improving Design Processes through Structured Reflection A Domain-independent Approach, Thèse de doctorat, Eindhoven Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands 2001.

* Wicked est un terme anglais ayant une signification semblable à celle de « malin » (contrairement à « bénin ») ou de « vicieux » (comme un cercle) ou de « rusé » (comme un lutin) ou de « agressif » (comme un lion, contrairement à la docilité d'un agneau). selon Rittel, H. W. ET Webber, M. M. (1973).

⁷ Rittel. H, et Webber. M, Planning problems are wicked problems, Policy Sciences, 4(2): P 155–169, 1973.

⁸ Kowaltowski et al, Methods that may stimulate creativity and their use in architectural design education, Int J Technol Des Educ, Springer Science+Business Media B.V. 2009.

⁹ Simon. H. A, The structure of ill-structured problems, Artificial Intelligence, 4, P 181-201, 1973.

¹⁰ Visser. W, La conception : de la résolution de problèmes à la construction de représentations, Presses Universitaires de France, Volume 72, P. 61-78, 2009.

¹¹ Laaroussi. A, Assister la Conduite de la Conception en Architecture: Vers un système d'information orienté, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.

Une caractérisation des problèmes de conception a été proposée par Rittel et Webber (1973)¹² :

- il n'y a pas une formulation définitive d'un problème mal-défini.
- un problème mal-défini n'a pas une règle d'arrêt.
- la solution est bonne ou mauvaise, et non vrai ou fausse.
- Il n'y a pas un test immédiat et ultime pour valider une solution d'un problème mal-défini.
- chaque solution d'un problème mal-défini résulte d'une opération unique parce qu'il n'y a aucune opportunité pour l'apprentissage «tentative/erreur ». Chaque étape est significative.
- un problème mal-défini n'a pas un ensemble exhaustif de solutions possibles.
- un problème mal- défini est fondamentalement unique.
- un problème mal-défini peut être examiné comme un symptôme d'un autre problème.
- chaque problème de conception peut avoir plusieurs représentations différentes.
- le concepteur n'a pas droit à l'erreur.

Lawson (2005) a également introduit une caractérisation des problèmes de conception dans le domaine de l'architecture¹³ :

- Les problèmes de conception ne peuvent pas être complètement cités. Or, il n'est jamais possible d'être sûr quand tous les aspects du problème ont émergé. En effet, beaucoup de caractéristiques des problèmes de conception ne peuvent jamais être entièrement découvertes et rendues explicites jusqu'à ce qu'une tentative ait été faite pour produire des solutions.
- Les problèmes de conception nécessitent une interprétation subjective : les problèmes de conception et l'information requise pour les résoudre dépendent dans une certaine mesure des idées des architectes. Ces derniers n'abordent pas un problème de la même manière. Par conséquent, les problèmes de conception portent des valeurs « value laden » et leur résolution est soumise à la perception subjective de l'architecte.
- Les problèmes de conception ont tendance à être organisés de façon hiérarchique (ex. poignée de porte - porte - mur - pièce - bâtiment - ville - pays - communauté

¹² Rittel, H, et Webber, M, Planning problems are wicked problems, Policy Sciences, 4(2): P 155–169, 1973.

¹³ Lawson, B, How designers think, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.

internationale). Autrement dit, un problème peut être le résultat d'un autre problème et ce dernier peut présenter les symptômes d'un autre problème.

- Les problèmes de conception sont multidimensionnels voir multicritères et fortement interactifs : la fenêtre offre un exemple excellent du problème multicritère (fig.1.1). Par exemple, elle doit prévoir une vue sur le paysage extérieur, assurer l'intimité, laisser passer la lumière du jour et par conséquent entraîner une grande perte de chaleur en hiver et une surchauffe en été.

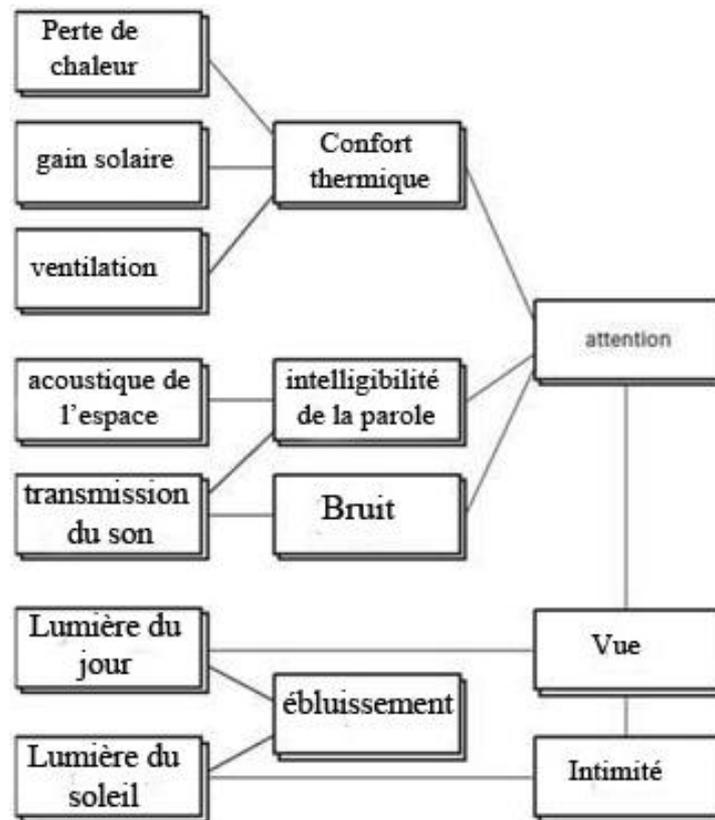


Fig.1.1 Un problème multicritère dans la conception d'une fenêtre
Source: Lawson, B. (2005)

I.2.3 Caractéristiques des solutions de conception :

Les concepteurs génèrent souvent, au début d'un projet, un noyau de solutions auquel ils restent fidèles dans l'élaboration de leurs projets. Ces solutions ont souvent besoin d'une intégration des considérations d'ordre technique, économique, environnementale, éthique...etc.

Les caractéristiques des solutions de conception sont ont été décrites par Lawson (2005)¹⁴ :

¹⁴ Ibid

- il y a un nombre inépuisable de solutions différentes tant que les problèmes de conception ne peuvent pas être complètement cités « mal-définis».
- il n'y a pas de solutions optimales aux problèmes de conception, ce qui laisse les concepteurs chercher des solutions acceptables et satisfaisantes. Cette recherche a été appelée par Simon (1995) « recherche de compromis (satisficing) » qui consiste à « *se contenter de ce qui est suffisamment bon* » (Simon, 1971-1975)¹⁵.
- les solutions aux problèmes de conception sont souvent holistiques dans le sens qu'elles répondent généralement à un nombre de problèmes plutôt qu'à une partie d'un problème. Elles sont des solutions intégrées.
- les solutions de conception sont une contribution au savoir et à la connaissance dans le sens qu'elles instaurent un changement et un progrès dans notre environnement d'une part et de l'autre part elles se font exploiter par les chercheurs.
- les solutions de conception sont des parties d'autres problèmes de conception, autrement dit, elles génèrent d'autres problèmes. Par exemple laisser passer la lumière du jour par une fenêtre est une solution pour éclairer une chambre sombre mais cette solution engendre le problème de la surchauffe pendant l'été.

I.2.4 Caractéristiques de la conception elle-même :

Cross (2007) a fait une caractérisation de la conception¹⁶ :

- La conception est rhétorique : ça veut dire convaincante dans le sens où le concepteur, Quand il est entrain de développer une proposition d'esquisse, construit des arguments, à partir desquels une conclusion finale est développée et évaluée sur la base d'objectifs connus précédemment.
- La conception est exploratoire : l'architecte ne prend pas les besoins des clients et le programme comme une spécification de la solution mais plutôt comme une carte partielle d'un territoire inconnu, et tente de l'explorer en vue de découvrir quelque chose de nouveau plutôt que des choses familières.
- La conception est émergente : dans la conception le problème et la solution se développent ensemble et simultanément.

¹⁵ Visser. W, La conception : de la résolution de problèmes à la construction de représentations, Presses Universitaires de France, Volume 72, , P. 61-78, 2009.

¹⁶ Nigel. C, Designerly Ways of Knowing, Birkhäuser, 2007.

- La conception est opportuniste : l'architecte ne peut pas prévoir ce que va se passer dans les phases ultérieures. Les directions suivies par lui sont le fruit de ce qu'il est entrain d'apprendre.
- La conception est « abductive » : dans le sens qu'elle est ni déductive ni inductive.
- La conception est réflexive : il y a un dialogue ou une conversation entre les représentations mentales internes et les représentations externes (esquisse) qui permet à l'architecte d'exprimer et d'externaliser ces idées à travers les dessins.
- La conception est ambiguë : l'architecte conçoit des projets extraordinaires mais il laisse toujours des choses obscures dans ses projets. Les concepts véhiculés par les solutions sont imprécis et sans véritable conclusion.
- La conception est risquée : il y a toujours lieu pour l'incertitude même pour les grands architectes.

Laaroussi (2007) a fait également une caractérisation de la conception architecturale en mettant en exergue ses propriétés dialogiques¹⁷ :

- Une activité cognitive et collective : elle exige et demande des savoirs multiples (esthétiques, techniques, climatiques, sociologiques...etc.)
- La multiplicité et la diversité des intervenants donnent une multiplicité et une diversité des points de vue : la complexité du projet architecturale dans ces années récentes exige le recours aux divers intervenants (acousticien, ingénieurs, topographe, coloriste, paysagiste...etc.). Cette multidisciplinarité et pluralité de la conception architecturale constitue un obstacle à une optimisation globale des différents points de vue souvent conflictuels et contradictoires.

La conception se caractérise également par son caractère matériel, son objectif est la conception d'un ou plusieurs objets physiques (artefacts) à réaliser matériellement grâce à une certaine technologie. En outre, le processus de conception en architecture et ingénierie concerne essentiellement des qualités formelles. Il s'agit de l'élaboration d'une certaine forme (à être réalisée matériellement) qui doit répondre à l'ensemble des besoins et des contraintes comme stipule Alexander « *le but ultime du design est la forme* »¹⁸.

Les caractéristiques du processus de la conception architecturale selon Lawson (2005)¹⁹ :

- Le processus est infini.

¹⁷ Laaroussi. A, Assister la Conduite de la Conception en Architecture: Vers un système d'information orienté, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.

¹⁸ Silvestri. C, Perception et conception en architecture non-standard, Une approche expérimentale pour l'étude des processus de conception spatiale des formes complexes, Thèse de doctorat,

¹⁹ Lawson. B, How designers think, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.

- Il n'y a aucun processus correcte infailliblement.
- Le processus implique des conclusions, aussi bien que une résolution des problèmes.
- Le processus implique inévitablement un jugement de valeur « value judgement ».
- Le processus est une activité prescriptive.
- Le concepteur travaille dans le contexte de besoin pour les actions.

I.2.5 Idée de conception :

Une bonne conception semble souvent avoir seulement très peu d'idées dominantes et majeures autour desquelles se structurent les considérations secondaires. Ces idées parfois peuvent être réduites à une seule idée principale appelée par les concepteurs « concept » ou « parti », et qualifié par Lawson de « holy grail ²⁰ ». Ces idées agissent dans le processus de conception architectural comme des balises mobiles qui interagissent entre elles. A un certain moment on peut privilégier une balise et ignorer une autre.

Philippe Boudon et al. montrent avec clarté les différents points de vue qui peuvent être associés à la notion d'idée²¹ : « *Mais qu'entendre au juste par 'idée'? Ne doit-on pas déjà distinguer l'idée au singulier, qui sous-tend un édifice, une œuvre, des idées de l'architecte? Les idées de l'architecte sont à comprendre comme des convictions générales, des croyances, des engagements de l'architecte ou, plus simplement, des opinions. Il s'agit aussi d'influences diverses, souvent culturelles, que recherche l'architecte lorsqu'il est en situation d'éveil, de réceptivité. L'architecte et plus largement tout concepteur se trouva souvent en situation de recherche d'inspiration. L'idée est à comprendre différemment. Elle permet de mettre en rapport intellect et production matérielle : l'idée, quelque part, opère dans le travail de l'architecte.* » (Boudon, 1994).

Pour Caragone (1995) la notion d'idée n'est pas bien définie et elle est dépendante du domaine auquel elle appartient. Par exemple, en conception, elle peut être un élément organisationnel ou formel qui sert comme un schéma ou un principe à suivre qui guide le processus de conception. Sémantiquement, l'idée architecturale pour Caragone (1995) est toujours exprimée métaphoriquement mais dans le sens visuel plutôt que le sens littéraire.

²⁰ « Holy grail » une tasse censée pour avoir été employé par Jésus-Christ au repas avant sa mort mais dans ce sens elle est quelque chose extrêmement difficile à trouver ou à obtenir.

²¹ Scaletsky. C. C, Rôle des références dans la conception initiale en architecture : Contribution au développement d'un Système Ouvert de Références au Projet d'Architecture le système « kaléidoscope », Thèse de doctorat, Ecole d'Architecture de Nancy, 2003.

Pour lui, une bonne idée est aisément perceptible et n'exige pas des clarifications ou des interrogations parce qu'elle est évidente dans la conception²².

Cette idée se rapporte aussi à des moments ou des temporalités diverses. Elle est divisé en trois temporalité²³ : (fig.1.2)

- Elle peu être déjà une partie du passé avant même le début du processus de la créativité ou de conception. Dans ce cas, elle appartient au domaine de référence et de l'expérience de l'architecte et s'appelle « l'idée de l'architecte ».
- Elle est le résultat d'un processus cognitif et participe effectivement dans le processus de conception et le guide en même temps. Dans ce cas on parle du présent et elle s'appelle l'idée « guide » ou « force ».
- Elle est associée à quelque chose que nous cherchons. Donc elle appartient à un produit futur du processus créatif. Elle est nommée « idée de projet ».

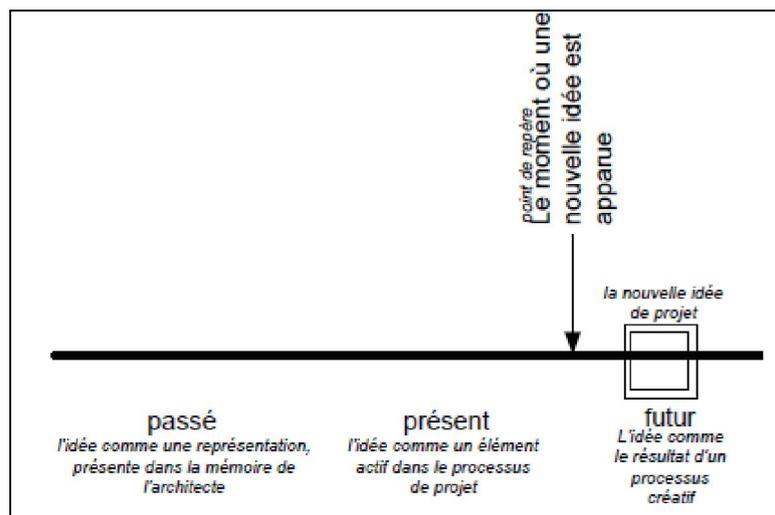


Fig.1.2 Chronologie de la présence des idées dans le processus de conception
Source : Scaletsky (2003).

I.2.6 La conception à travers le dessin:

Ganshirt (2007) a réalisé une caractérisation des différents outils de la conception. Pour lui le geste, le croquis, le langage, le dessin, la maquette, la perspective, la photographie, le film et la vidéo, la CAO, la critique et la théorie sont des outils de la conception²⁴. Ces

²² Anay, H, Two evolutionary models for reconceptualizing architectural ideas and the architectural design process, Thèse de doctorat, Middle east technical university, 2008.

²³ Scaletsky, C. C, Rôle des références dans la conception initiale en architecture : Contribution au développement d'un Système Ouvert de Références au Projet d'Architecture le système « kaléidoscope », Thèse de doctorat, Ecole d'Architecture de Nancy, 2003.

²⁴ Marin, P, Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) ,2010.

outils aident les concepteurs à extérioriser ce qui est intériorisé dans leurs cerveaux « la boîte noire ». « *Ils facilitent la mémorisation, l'observation et la communication des phénomènes* » (Arielli, 2003)²⁵. Shon (1983) dans son ouvrage phare « *the reflective practionner* » a stipulé qu'il y a une conversation ou un dialogue entre l'architecte et lui-même à travers les représentations²⁶.

William Mitchell et Malcom McCullough (1991) ont proposé un cadre d'analyse des medias convoqués dans le processus de conception. Chaque médiation peut prendre place dans un repère à deux dimensions. Un axe caractérise le nombre des dimensions de la représentation, de deux dimensions à n dimensions et un second axe précise le type du support analogique ou numérique. Laiserin (Laiserin 2008) a ajouté un troisième axe relatif au mode d'exploration, allant du « form-finding » au « form-making ». Le « form-making » représente un processus d'inspiration, la forme précède l'analyse programmatique et les contraintes de la conception. Le « form-finding » est caractérisé par une composante d'analyse fonctionnelle forte²⁷.

I.2.6.1 Le rôle du dessin :

Dans un sens global, dessiner signifie « *laisser une empreinte ou trait sur un support au moyen d'un instrument, pour y transcrire une idée* » (YAN, 2005)²⁸. Les concepteurs sont inextricablement associés au dessin et la plupart des personnes imaginent un concepteur quelqu'un qui s'assois devant une table de dessin et dessine. Donc, le dessin est une source de connaissance que le concepteur emploie quand il est stagné « the state of being stuck » ou rencontre « un mur vertical » dans les termes de Goel (1995)²⁹. Le concepteur industriel Jack Howe avait dit : « *Je dessine quelque chose -même si elle est farfelue- l'acte de dessiner semble clarifier mes idées* »³⁰.

Tout d'abord on doit classifier les types de dessin que les architectes emploient. Plusieurs chercheurs ont introduit des différents systèmes pour la classification des dessins.

²⁵ Silvestri, C, Perception et conception en architecture non-standard, Une approche expérimentale pour l'étude des processus de conception spatiale des formes complexes, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2009.

²⁶ YÜNCÜ, O, Research by design in architectural design education, Thèse de doctorat, Middle East Technical University, 2008.

²⁷ Marin, P, Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) ,2010.

²⁸ Silvestri, C, Perception et conception en architecture non-standard, Une approche expérimentale pour l'étude des processus de conception spatiale des formes complexes, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2009.

²⁹ Lawson, B, what designers know, Elsevier, 2004.

³⁰ Nigel, C, Designerly Ways of Knowing, Birkhäuser, 2007.

Pour Ferguson (1992), il existe trois familles de dessins³¹ :

- Le dessin conceptuel qui matérialise l'activité mentale du concepteur. C'est un dessin qui extériorise l'idée de l'architecte et il est adressé au concepteur avant tout.
- Le dessin de communication qui supporte la communication et la médiation entre les acteurs du projet.
- Le dessin prescriptif qui décrit l'objet conçu pour permettre sa réalisation.

Fraser et Henmi (1994) ont également analysé spécifiquement les dessins d'architecture et suggéré un système de classification basé sur une taxonomie fondée sur l'analyse des caractéristiques des dessins. Ils ont identifié cinq types de dessins³² :

- Dessin référentiel ;
- Les diagrammes ;
- Dessin de conception ;
- Dessin de présentation ;
- Dessin visionnaire.

Lawson (2004) a critiqué cette classification en arguant qu'elle n'est pas pertinente du fait elle s'intéresse aux caractéristiques des dessins d'architecture plutôt que la connaissance et la manière avec laquelle la connaissance est manipulée dans les esprits des membres de l'équipe de conception et communiquée à d'autres participants.

Estevez (2001) a proposé une classification pertinente basée sur les fonctions particulières des dessins au long de la durée du projet d'architecture³³ :

- La fonction spéculative qui est un support à l'activité conceptuelle.
- La fonction descriptive qui permet la maîtrise de la forme et de l'apparence à travers sa figuration.
- La fonction prescriptive qui vise la construction matérielle de l'édifice.

Lawson (2004) a proposé une classification basée sur le type de la connaissance que le dessin transmet aux concepteurs³⁴ :

- Le dessin de représentation.
- Le dessin instructif.
- Le dessin de consultation.
- Le dessin expérientiel.

³¹ *ibid*

³² *Ibid*

³³ Marin, P, « Outils d'évaluation des qualités solaires passives du bâtiment ;exploration des mécanismes de la conception révolutionnaire », MAP ARIA CRAI, UMR n°694/CNRS/CULTURE.

³⁴ Lawson, B, what designers know, Elsevier,2004.

- Les diagrammes.
- Le dessin fabuleux.
- Le dessin de calcul.

La classification la plus récente avait été proposée par Silvestri (2009). Pour lui il y a deux familles de dessins :

- Le dessin artistique : (dessin à main levée, croquis...etc.) les figures produites sont liées directement aux objets réels perçus, ce qui permet de mettre en relation les données figuratives et les données perceptives.
- Le dessin géométrique : les figures sont analysées et manipulées au niveau abstrait et analytique (principalement à travers des qualités métriques), ce qui permet de mettre en relation les données figuratives et les données analytiques.

Tant que notre travail porte sur une approche intégrée de la conception architecturale, on s'intéresse aux types de dessins utilisés dans les premières phases de conception (le croquis et le diagramme) qui aident l'architecte à prendre une vue holistique des problèmes de conception.

Le croquis est une représentation réaliste de son homologue³⁵. Il se caractérise par l'absence des mesures exactes et des codes iconiques conventionnels. Par le biais du croquis le concepteur représente ce qu'il voit dans son espace mental ; c'est l'activité de regarder avec les yeux de l'esprit. L'esquisse est définie comme étant une représentation personnelle non ou peu normalisée. Elle reste floue, incomplète et polymorphe, elle supporte des simulations mentales et conduit à l'auto émergence. Elle est un système composé de représentations multiples évoquant à la fois une expression géométrique et topologique. De plus, elle contient la progression des différents niveaux de conception (Leclercq 2005)³⁶.

Goldschmidt (1997) a constaté que quand des propositions de conception soient produites, la fréquence des changements entre les arguments figuratifs et les arguments conceptuels est plus élevée par rapport aux autres épisodes de la conception, ce qui suggère qu'il y a une interaction élevée entre les croquis et les idées relatives à ces croquis pendant ces moments de découverte³⁷.

³⁵ Fehmi. D, The role of conceptual diagrams in the architectural design process, Thèse de Doctorat, Georgia institute of technology, USA 2003.

³⁶ Marin. P, Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) ,2010.

³⁷ Fehmi. D, The role of conceptual diagrams in the architectural design process, Thèse de Doctorat, Georgia institute of technology, USA 2003.

Schön (1994) a proposé une interaction dialectale similaire à celle de Goldschmidt (1997). Schön a démontré comment l'acte de dessiner (action) s'insère dans l'épistémologie de réflexion dans l'action et sur l'action : « *La cadence de son geste peut varier à volonté. Il peut ralentir pour réfléchir à ce qu'il fait. Par ailleurs, d'un coup de crayon il peut remodeler une pente, abattre des arbres dans la seconde alors que sur les chantiers ce sont des opérations qui prennent du temps. Il peut revenir sur son geste, le transformer, voir ce que cela donne et prendre une nouvelle feuille pour essayer autre chose. Il peut donc réaliser des séquences d'apprentissage où il corrige ses erreurs et tient compte des résultats imprévus de ses gestes.* »³⁸

Ce qui est commun entre Goldschmidt et Schön est l'idée que les changements soient locaux ou incrémentaux, ils mènent cumulativement vers un changement holistique, que Schön l'a décrit comme « découverte des conséquences involontaires. »

Suwa, Purcell et Gero (1998) ont confirmé également que les croquis servent à trois buts. Ils fournissent une mémoire externe dans laquelle des idées peuvent être déposées pour une inspection ultérieure. Ils fournissent également des signaux visuels pour l'association de sujets fonctionnels. Les croquis, et c'est le point le plus important, servent également à la cristallisation physique dans laquelle les pensées fonctionnelles, dans une situation donnée, se construisent librement³⁹.

I.3 Etat de l'art des méthodes de conception :

Bien que Bayazit ait rapporté les motifs des recherches sur la conception aux besoins économiques et sociaux de la société après la deuxième guerre mondiale⁴⁰, Durand avait déjà présenté, en 1802, un travail d'articulation de la conception⁴¹. En 1920, un modèle de conception décrivait également comment développer un cuirassé pour la marine royale. Les discussions au sujet de la conception ont commencé sérieusement quelques années après la deuxième guerre mondiale⁴².

Les méthodes de conception se sont développées lors des recherches militaires et les efforts menés dans les trois domaines, recherche opérationnelle, cybernétique et gestion

³⁸ Scaletsky. C. C, Rôle des références dans la conception initiale en architecture : Contribution au développement d'un Système Ouvert de Références au Projet d'Architecture le système « kaléidoscope », Thèse de doctorat, Ecole d'Architecture de Nancy, 2003.

³⁹ Nigel. C, Designerly Ways of Knowing, Birkhäuser, 2007

⁴⁰ Bayazi. N, " Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research", Design Issues: Volume 20 , Number 1, P. 19, 2004.

⁴¹ Arrouf et Bencasi, « Modélisation du processus de conception : Etude expérimentale du système compositionnel », Courrier du Savoir, N°07, Décembre 2006, pp.59-65.

⁴² Hugh. H, How do u design , Dubberly Design Office, San Francisco, USA, 2004.

des projets technologiques à grande échelle. Les efforts d'avant-guerre pour faire du radar une partie efficace du système britannique de la défense aérienne ont mené à la recherche opérationnelle. Le développement des dispositifs et des systèmes de pilotage automatique et les systèmes de contrôle feu pour les grands pistolets ont mené aux servomécanismes et aux dispositifs de calcul, par leur tour, ont conduit à l'apparition de la cybernétique, l'une des racines de l'intelligence artificielle. Les grands projets de technologie entrepris pendant la guerre et les projets postérieurs de la guerre froide tels que l'atlas et les missiles de Titan avaient besoins de nouvelles techniques pour aborder la complexité⁴³. Toutes ces recherches pour scientifier le processus de conception ont mené au mouvement de « Design Methods » des années 60. Exactement, c'est la conférence de « Design Methods » tenue à Londres en Septembre 1962 qui est généralement considérée comme l'événement qui marqua le lancement de la méthodologie de la conception comme une discipline autonome⁴⁴.

I.3.1 Les différentes classifications des méthodes de conception :

Après 50 ans de la conférence du « design methods », on ne trouve pas un consensus entre les théoriciens de la conception sur une méthodologie claire et une classification bien précise des méthodes de conception.

Levy (1981) a identifié cinq changements de paradigme « paradigm shift »⁴⁵. Le premier s'est produit en 1920 quand les arts industriels avaient remplacé l'artisanat. Le deuxième changement au début des années 30 avait comme résultat l'apparition de la profession « designer ». Le troisième s'est produit dans les années 50, quand le débat portant sur les méthodes de conception avait commencé. Le quatrième changement a eu lieu dans les environs de 1970 et observait l'établissement de la recherche sur la conception. Dans les années 80, le cinquième paradigme a vu le jour. Il s'agissait de l'adoption d'une approche holistique à la théorie de conception et à l'émergence du concept de l'idéologie de conception.

Selon Eide (1997) deux systèmes scientifiques dominants sont à distinguer dans la philosophie de la science⁴⁶. La vision traditionnelle au sein des sciences naturelles et

⁴³Ibid

⁴⁴ Board of International Research in Design BIRD, *Design research now: Essays and Selected Projects*, Ralf Michel (ed.) Birkhäuser Verlag AG, Berlin, Germany 2007.

⁴⁵Bridges A. H. , "Any progress in systematic design? ", *CAAD FUTURES DIGITAL PROCEEDINGS*, Ch1, 1986, P. 5-15.

⁴⁶ Reymen. I, *Improving Design Processes through Structured Reflection A Domain-independent Approach*, Thèse de doctorat, Eind Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands 2001.

techniques qui s'appelle « le positivisme » et « le constructivisme » qui a émergé dans les sciences sociales dans la deuxième moitié du siècle précédent. La recherche sur la conception est basée principalement sur l'approche positiviste. Cependant, dans les années récentes, beaucoup de recherches basées sur le paradigme constructiviste ont été effectuées.

Aussi, selon Finger et Dixon (1989), il y a deux types de méthodes⁴⁷ :

- Les méthodes descriptives : elles sont le résultat de la recherche sur la pratique réelle de la conception. Elles sont basées sur des théories générales et ne sont pas destinées à un domaine bien déterminé.
- Les méthodes prescriptives : elles ont pour objectif l'amélioration de l'efficacité de certains aspects de la conception du projet. Telles méthodes visent un public particulier (étudiants, architectes...etc.). Elles prescrivent les indications, les conseils, les étapes ou les techniques qui, une fois mises en application correctement, vont améliorer la performance des aspects spécifiques du projet. Autrement dit, elles ont pour but l'amélioration de la visibilité du processus de conception aux participants de la conception.

Bensaci et Arrouf (2006), voient que trois paradigmes ont marqué la recherche sur la conception architecturale⁴⁸ :

- Le paradigme introspectif à base de conjectures sur la manière dont les humains conçoivent. Il a produit des modèles prescriptifs (Asimov, 1962; Jones et Thornley, 1962; Broadbent, 1973) qui ne rendent pas compte du travail effectif de conception.
- Le paradigme applicationniste qui emprunte des modèles aux autres domaines de connaissance en vue d'étudier la conception architecturale.
- Le paradigme des sciences de l'architecture, en cours d'élaboration, offre un cadre scientifique pour le développement des recherches sur la conception architecturale. Les recherches qui s'en réclament proposent de construire les objets théoriques de connaissance de la discipline et d'en développer des méthodes adéquates.

Pour Dorst (1997), il y a deux paradigmes dans l'histoire des méthodes de conception :

- Le paradigme de la résolution de problème rationnellement :

Les méthodes dans ce paradigme basé sur une méthodologie descriptive ont été influencées par les théories des systèmes techniques qui considèrent la conception comme un processus

⁴⁷ Clarkson, J, et Eckert, C, Design process improvement :A review of current practice, Springer-Verlag, London, 2005.

⁴⁸ Arrouf et Bensaci, « Modélisation du processus de conception : Etude expérimentale du système compositionnel », Courrier du Savoir, N°07, Décembre 2006, pp.59-65.

rationnel. Simon (1969) a fourni un cadre pour étudier la conception et de ses problèmes de conception dans ce même paradigme de rationalité technique. Dans son œuvre « *la science de l'artificiel* » publiée aux Etats-Unis en 1969, Simon a défini la vision classique de la résolution du problème comme : « *une exploration au sein d'un immense labyrinthe des possibles, un labyrinthe qui décrit l'environnement. La réussite en matière de résolution suppose quelques sélections dans l'exploration de ce labyrinthe, et la possibilité de réduire assez son étendue pour que l'on puisse s'y diriger.* » (Simon, 1991)⁴⁹.

Goël et Pirolli (1989) ont caractérisé les différentes démarches suivies par les concepteurs lors de la résolution des problèmes⁵⁰ : une activité de structuration, un développement simultané de plusieurs modèles et une évaluation cyclique et des approximations successives⁵¹.

- Le paradigme de la réflexion dans l'action :

« *The most effective, most creative problem solvers engage in a process of meta-thinking or thinking about thinking. Meta thinking means that you are aware of how you are thinking as you are doing the thinking. Meta-thinkers engage in continual internal dialogue of testing, stretching, criticizing and redirecting their thought processes.* » (Frederick 2007)⁵²

Les paroles de Frederick s'inscrivent dans le caractère réflexif de la conception, il s'agit d'une théorie constructiviste proposée par Schön en réaction à l'approche positiviste de résolution du problème. La pratique devient un moteur du processus d'apprentissage. Ce dernier dépend de l'environnement culturel et de l'expérience du concepteur. Mais, il aussi un dialogue permanent entre le concepteur et lui-même qui s'instaure. Schön appelle cette activité le talent artistique de la pratique de la conception « *the artisery of the design practise* ⁵³».

Schön pense que la résolution de ces problèmes uniques passe par une conversation réflexive avec le contexte basé sur le processus de perception et la réflexion humaine. Pour lui, c'est l'activité de « *seeing-drawing-seeing* » qui va permettre à cette réflexion

⁴⁹ Laaroussi. A, Assister la Conduite de la Conception en Architecture: Vers un système d'information orienté, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.

⁵⁰ Marin. P, Exploration des mécanismes évolutifs appliqués à la conception architecturale, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) ,2010.

⁵¹ Marin. P et al, outil révolutionnaire d'aide à la conception architecturale creative, CAAD futures, Montréal ,2009.

⁵² Marin. P, Exploration des mécanismes évolutifs appliqués à la conception architecturale, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) ,2010.

⁵³ Reymen. I, Improving Design Processes through Structured Reflection A Domain-independent Approach, Thèse de doctorat, Eindhoven Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands 2001.

stockée de devenir visualisable, interprétable, et à une nouvelle idée d'émerger ou une modification de la précédente. Selon Schön, c'est une stimulation permanente de l'acte de conception. Cette activité de structuration et de restructuration est essentielle selon lui, « *c'est plutôt par la structuration de la situation problématique qu'on puisse organiser et clarifier à la fois les objectifs à poursuivre et les moyens possibles pour les atteindre, il ne s'agit pas d'un processus technique* (Schön, 1994) »⁵⁴. Cela qui n'est pas le cas du premier paradigme où la définition du problème est constante et stable.

Selon Gero (1999), la notion de "réflexion" de Schön offre une base cognitive pour l'activité de conception parce qu'elle fournit l'habileté à réinterpréter ce qui a été dessiné. Cette activité de réinterprétation est l'un des traits distinctifs de la conception, et qui n'existe pas dans le paradigme de résolution de problème⁵⁵.

Gero (Gero and Maher 1993) a complété la notion de conception comme résolution de problème et proposé le paradigme de « conception comme conception »⁵⁶. Le résumé de ces deux paradigmes est dans le tableau 1.1.

	Résolution de problème rationnellement	La réflexion dans l'action
concepteur	Personne qui traite l'information (dans une réalité objective)	Personne qui construit sa réalité
Problème de conception	Mal défini, non structuré	Essentiellement unique
Processus de conception	Un processus de recherche rationnel	Une conversation réflexive
Connaissance de conception	Connaissance des procédures de conception et des lois scientifiques	Art de la conception : quand appliquer quelle procédure
exemples	Optimisation de la théorie, les sciences naturelles	Art, les sciences sociales

Tableau 1.1 deux paradigmes de conception d'après Dorst (1997).
Source: Reymen, Isabelle M.M.J. (2001)

⁵⁴ Scaletsky. C. C, Rôle des références dans la conception initiale en architecture : Contribution au développement d'un Système Ouvert de Références au Projet d'Architecture le système « kaléidoscope », Thèse de doctorat, Ecole d'Architecture de Nancy, 2003.

⁵⁵ Laaroussi. A, Assister la Conduite de la Conception en Architecture: Vers un système d'information orienté, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.

⁵⁶ Marin. P, Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), 2010.

Wynn et Clarkson (2005) ont proposé trois classifications différentes des méthodes et modèles de la conception⁵⁷ :

1-Modèles basés sur étapes / activités « stage-based vs activity-based models » :

Selon Blessing (1994), les modèles de conception peuvent être divisés en quatre catégories représentées dans la fig.1.3.

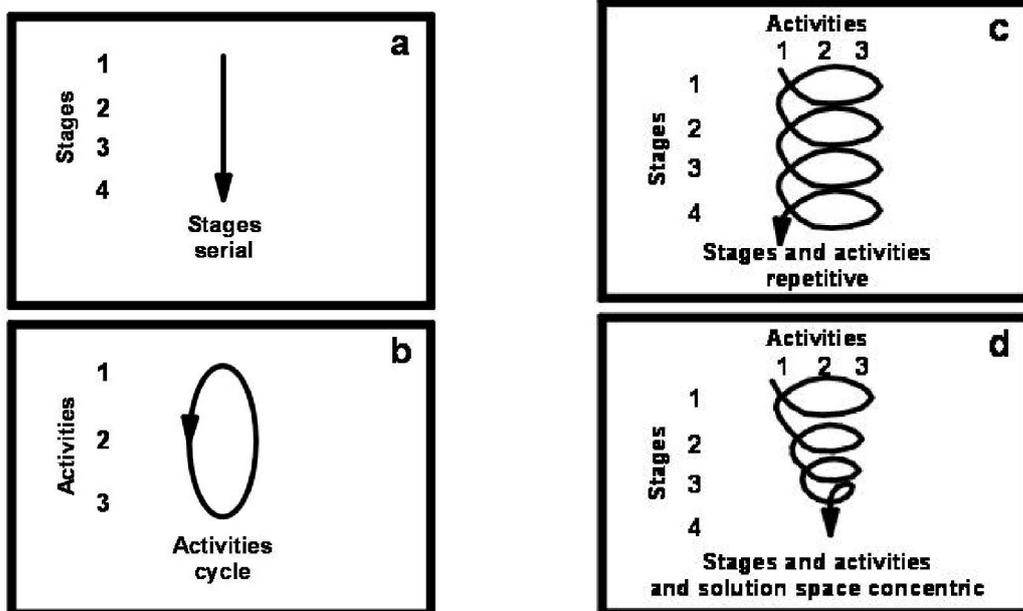


Fig.1.3 Typologie des modèles de conception d'après Blessing (1994)
Source : Clarkson, J. et Eckert, C (2005)

2- La littérature de la conception basée sur les solutions et celle basée sur les problèmes « problem-oriented vs solution-oriented literature »

- Les modèles axés sur les solutions : sont ceux dans lesquels une solution initiale est proposée, analysée et puis modifiée à plusieurs reprises
- Les modèles axés sur les problèmes : sont ceux dans lesquels l'accent est mis sur l'abstraction et l'analyse de la structure du problème avant de produire les solutions possibles.

3-Approche abstraite/ analytique / procédurale.

- Les approches abstraites : elles sont proposées pour décrire le processus de conception à un à niveau élevé d'abstraction. Une telle approche est souvent appropriée à un large éventail des situations, mais n'offre pas des conseils, des

⁵⁷ Clarkson, J. et Eckert, C, Design process improvement :A review of current practice, Springer-Verlag, London, 2005.

clarifications et des indications spécifiques et utiles pour l'amélioration du processus.

- Les approches analytiques : elles sont utilisées pour décrire des exemples particuliers de projets de conception. Elles se composent de deux parties : une représentation destinée à décrire les aspects de la conception du projet comme la matrice de la structure ; et les techniques, les procédures ou les outils informatiques, qui emploient la représentation pour comprendre mieux ou améliorer le processus de la conception.
- Les approches procédurales : elles sont plus concrètes et mettent l'accent sur un aspect spécifique du projet. Elles sont moins générales que des approches abstraites, mais plus appropriées dans la pratique.

I.3.2 Etat de l'art des méthodes de conception :

Les classifications qui nous semblent pertinentes et précises sont celles de Cross (1993)⁵⁸ et de Bayazit (2004)⁵⁹ parce qu'elles suivent une logique chronologique. En outre, elles sont simples et récentes, ce qui permet d'aborder un grand nombre de méthodes de conceptions. Les deux auteurs sont arrivés à la conjecture que l'histoire des méthodes de conception a connu deux générations des méthodes de conception, celle de la première génération et celle de la deuxième génération.

La première génération des méthodes est apparue après la conférence de 1962 et c'est la première fois que les « méthodes de conception » reçoivent une reconnaissance académique mondiale. Cette génération était le résultat de la pression imposée par les besoins de la deuxième guerre mondiale. Ces méthodes étaient basées sur l'application de méthodes systématiques, rationnelles, et scientifiques comme la méthode d'Asimow (1962), d'Alexander (1964), de Jones (1970)...etc.

Cependant, les années 70 sont connues par le rejet de cette méthodologie de conception et une deuxième génération de méthodes a vu le jour et les tentatives d'optimisation par le concepteur se sont orientées vers les solutions satisfaisantes.

Une troisième génération basée sur la combinaison des deux générations précédentes a vu le jour dans des années 90 comme le modèle proposé par Cross (1989), sur la

⁵⁸ Cross, N, " Science and Design Methodology": A Review, Research in Engineering Design ,1993, 5:63-69.

⁵⁹ Bayazi, N, " Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research", Design Issues: Volume 20 , Number 1, 2004.

compréhension de la nature « commutative » (Archer 1979) du problème et la solution dans la conception.

I.3.2.1 Les méthodes de la première génération :

○ La méthode de George Polya (1945) :

Dans son ouvrage phare « *How to Solve It* », Polya (1945) a proposé une méthode de résolution des problèmes. Beaucoup de théoriciens des méthodes de conception avaient adopté sa méthode qui a traité au début la résolution des problèmes mathématiques et ensuite a été appliquée aux problèmes de la conception en général. Le déroulement de la méthode est montré dans le tableau 1.2.

phases	description
La compréhension du problème	Quel est l'inconnu. Quelles sont les données. Quelle est la condition. Dessiner une figure. Introduire une notation appropriée. Séparer les différentes parties de la condition. Pouvez-vous les noter ?
Division du plan	Trouver le lien entre les données et l'inconnu. Connaissez-vous un problème relatif ? Regarder l'inconnu. Voici le problème lié au votre et déjà résolu avant. Pourriez-vous l'employer ? Pourriez-vous redire le problème ? Pourriez-vous le dire encore différemment ? Feed-back à la définition. vous devriez obtenir par la suite un plan de la solution.
L'effectuation et l'exécution du plan	vérifier chaque étape. pouvez-vous voir clairement que l'étape est correcte ? pouvez-vous montrer qu'elle est correcte ?
Le regard en arrière	vérifier le résultat. pouvez-vous dériver le résultat différemment ? pouvez-vous employer le résultat, ou la méthode, pour un autre problème ?

Tableau 1.2 la méthode de George Polya (1945). Source : Hugh (2004). Réadapté par auteur

○ La méthode d'Assimow (1962) :

En se basant sur les travaux de Hall (1962), qui a proposé une perspective de développement du projet à deux dimensions dans laquelle une structure composée des phases du cycle de vie du projet se positionne orthogonalement au processus itératif de la

résolution des problèmes qui se déroule dans chaque phase⁶⁰. Asimow a stipulé également que le processus de conception se compose de deux structures ; une structure verticale qui implique des activités séquentielles - de la définition des besoins, étude de faisabilité, conception préliminaire, la conception détaillée, planification de la production à la production réelle - et une autre structure horizontale sous la forme d'un cycle « analyse-synthèse-évaluation-communication », commun à toutes les phases de la structure verticale⁶¹. Asimow a décrit la première structure verticale comme « *la dimension morphologique* » du processus de conception et la structure horizontale comme « *la dimension de la résolution des problèmes* »⁶² en stipulant « *la conception est une progression de l'abstrait vers le concret. (Cela donne une structure verticale d'un projet de conception.) . . . la conception est [aussi] un processus itératif de résolution des problèmes. (Cela donne une structure horizontale à chaque étape de conception.)* »⁶³

La structure verticale se compose des étapes suivantes :

- Feasibility study (l'étude de faisabilité)
- Preliminary design (la conception préliminaire)
- Detailed design (la conception détaillée)
- Planning for production (La planification pour la production)

Alors que la structure horizontale se compose des étapes suivantes :

- **analyse**
- **synthèse**
- **évaluation**
- décision
- optimisation
- révision
- Implémentation
- **La méthode de Jones (1963) :**

⁶⁰ Clarkson. J, et Eckert. C, Design process improvement :A review of current practice, Springer-Verlag, London, 2005.

⁶¹ Dehlinger. J et Dehlinger. H, Architecture, design methods and Inca structures :Festschrift for Jean-Pierre protzen, Kassel university press,2009.

⁶² Clarkson. J, et Eckert. C, Design process improvement :A review of current practice, Springer-Verlag, London, 2005.

⁶³ Hugh. H, How do u design , Dubberly Design Office, San Francisco,USA,2004.

Une autre méthode a été proposée par Jones (1963) et qui suggère que le processus de conception passe par la structure de base suivante: analyse, synthèse et évaluation⁶⁴. (fig.1.4)

- La phase d'analyse : elle comprend une collecte inconditionnelle de l'information, la reformulation de cette information à des critères (objectifs), et une division de ces critères en sous-critères (sous-objectifs).
- La synthèse : elle comprend la création des sous-solutions, chacune est une solution à un sous-critère.
- L'évaluation est une vérification des réponses des sous-systèmes et les solutions choisies aux critères différents.

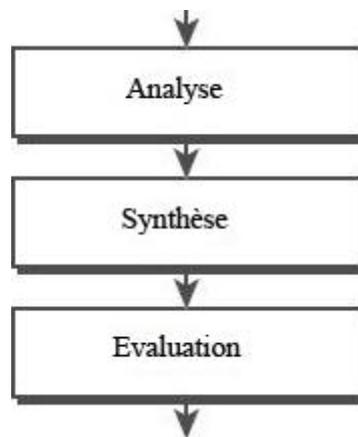


Fig.1.4 La méthode de Jones (1963)
Source: Jones, J. (1970)

Jones (1970) a fait aussi une description de 35 méthodes, y compris les méthodes pour explorer des situations de conception, les méthodes de recherche des idées, les méthodes pour explorer la structure du problème, et les méthodes d'évaluation⁶⁵. Ces méthodes une fois appliquées correctement stimulent la créativité et permettent à des nouvelles idées d'émerger⁶⁶.

○ **La méthode d'Alexander (1963) :**

Christopher Alexander est le premier chercheur qui a utilisé la théorie des graphes et des ensembles dans une méthode de conception qu'il a décrit dans son livre phare « *Notes on The Synthesis of Form* » (1964).

⁶⁴ Jones, J, *Design Methods: Seeds of Human Futures*, Wiley-Interscience, London, UK, 1970

⁶⁵ Ibid

⁶⁶ Kowaltowski et al, *Methods that may stimulate creativity and their use in architectural design education*, *Int J Technol Des Educ*, Springer Science+Business Media B.V. 2009.

Alexander (1964) a commencé son argumentation en revenant à l'histoire de la conception. La conception pour lui était iconique. Cette conception iconique qu'il l'a qualifiée de « unselfconscious »⁶⁷ représente une bonne « adaptation » entre la construction et l'utilisateur ; une adaptation qui ne sera jamais réalisée par une conception analogique.

Pour Alexander, le concepteur est souvent séduit par l'excellence de ses propres croquis, c'est pour ça, il a proposé de prendre à nouveau la conception comme un processus d'abstraction du problème et ensuite convertir le problème en symboles mathématiques, et par conséquent, le concepteur sentira neutre vis à vis le problème.

L'essentiel pour Alexander est le fait que la conception de la forme est déterminée par le contexte dans lequel elle devrait être insérée en arguant que chaque problème de conception exige la réalisation d'une l'adaptation « fitness » entre deux entités : la forme en question et son contexte. Il a ajouté « *la forme est la solution du problème ; le contexte définit le problème* »⁶⁸.

Pour Alexander, la conception « unselfconscious » est définie par la tradition et, de ce fait, on n'a pas besoin à des concepteurs spécialisés pour concevoir des produits tant que les lois de la tradition guident cette conception. Lorsque une inadaptation « misfit » se produit entre la forme et le contexte, elle est résolue par l'utilisateur lui-même qui joue le rôle d'un usager et un concepteur à la fois. Pour lui, la forme et le contexte sont un ensemble et l'inadaptation « misfit » de la forme au contexte peut être en terme de taille, couleur...etc. Une inadaptation « misfit » d'une seule variable engendre une inadaptation « misfit » de l'ensemble dans sa totalité. Il a stipulé que le problème de toute conception est de trouver les variables pertinentes et l'équilibre entre la forme et le contexte se maintient jusqu'à l'apparition d'une inadaptation.

Par contre, la conception « selfconscious » est faite par les concepteurs spécialisés qui ont étudié à l'université et ont un bagage théorique. Trouver l'inadaptation et la conceptualiser pour développer une solution adéquate est devenue très difficile pour lui. Selon Alexander, la conception d'aujourd'hui est « selfconscious » et notre incapacité de résoudre les problèmes de conception est liée au problème de l'adaptation.

Alexander a décrit trois situations dans lesquelles l'acte de concevoir peut se produire (tableau 1.3). Dans la première situation, un artisan travaille directement et naturellement suivant une interaction bidirectionnelle complexe entre le contexte C1 et la forme F1, dans

⁶⁷ Unselfconscious : par sa nature

⁶⁸ Alexander. C, De la synthèse de la forme, Dunod, Paris, 1971.

le monde lui-même. Dans la deuxième situation, la conception est séparée de la fabrication. La forme est configurée par une image conceptuelle du contexte inventé par le concepteur d'une part et les idées, les diagrammes, les schémas, et les dessins qui représentent la forme, d'autre part. Dans le troisième cas, le concepteur travaille naturellement « unselfconsciously ». Dans cette situation, il y a des représentations abstraites et formelles du problème et de la solution pour que lui et d'autres puissent les inspecter et modifier.

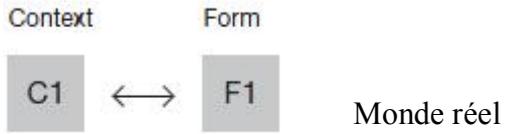
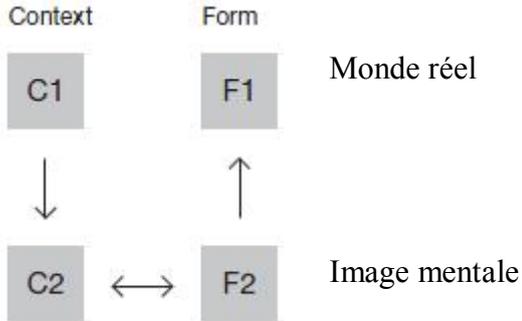
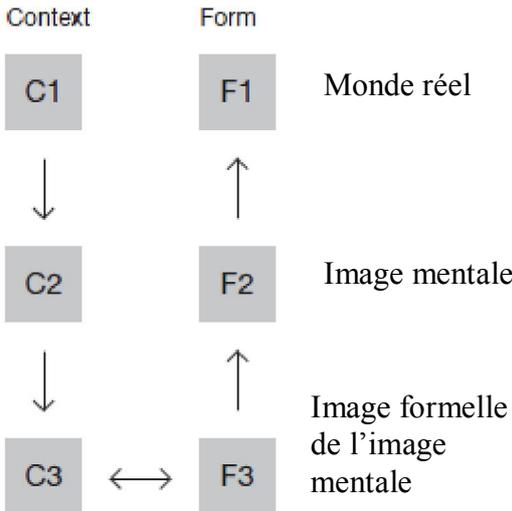
<p>« Unselfconscious » naturel</p>	
<p>« Self-conscious »</p>	
<p>Situation intermédiaire</p>	

Tableau 1.3 Les trois situations de conception selon Alexandre. Réadapté par Autour
Source: Hugh (2004)

La méthode d'Alexander a tenté également d'assimiler les procédures de conception à une décomposition hiérarchique, sous forme d'arbre, du problème de départ en une série de sous- problèmes jusqu'à obtenir un élément simple (fig.1.5). La racine de l'arbre représente la racine du problème, sa division en branches représente la division du problème en grandes catégories, et chaque sommet terminal du graphe représente une seule variable inadaptée. La solution pourrait être trouvée en résolvant chaque variable inadaptée, d'une manière cartésienne, et ensuite construire une réponse complète à travers une synthèse générale.

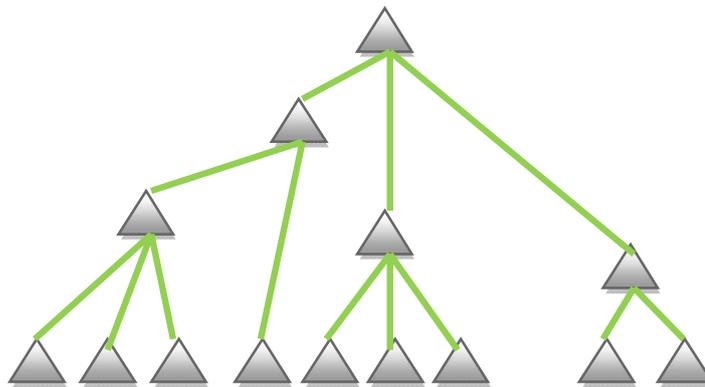


Fig.1.5 L'arbre de la théorie des graphes. Source : Alexander (1971).
Réadapté par auteur

Broadbent (1988) a critiqué l'utilisation de l'arbre par Alexander en arguant qu'on ne peut pas regrouper les sommets terminaux d'un arbre du fait que chacun est séparé et la seule façon de les relier est de revenir via le tronc principal de l'arbre, alors que, la formation de l'arbre, par sa nature même, préserve la structure originale du problème. En d'autres termes, en s'orientant vers une nouvelle étape d'abstraction, Alexander a aggravé le problème parce que si on laisse la conception à ce stade, sous la forme de diagrammes abstraits, la méthode serait moins utile et pratique que les méthodes de conception conventionnelle. Pour lui, ces dernières au moins montrent les relations spatiales entre les chambres et les autres pièces dans le cadre d'une conception réelle, même si elles ne montrent pas les formes des pièces elles-mêmes. Pour Broadbent, les diagrammes d'Alexander ne permettent pas d'être traduits et convertis en un bâtiment en trois dimensions⁶⁹.

Dans le cas du village indien (Alexander, 1963-1964), Alexander a trouvé 141 variables inadaptées. Cette méthode a été critiquée par Broadbent (1988) en arguant que les

⁶⁹ Broadbent, J. Design in Architecture: architecture and the human sciences, David Fulton publishers, Great Britain, 1988

concepteurs pourraient identifier des listes tout à fait différentes de variables inadaptées. Alexander a rejeté ces objections en arguant que tous les concepteurs vont atteindre la même liste tôt ou tard même si l'ordre d'importance qu'ils donnent aux différentes variables peut varier selon des prédictions personnelles. En pratique, ce n'est pas le cas selon Broadbent⁷⁰.

Dans le fameux livre « community and privacy », Alexander et Chermayeff (1963) ont énuméré 33 exigences de base (variables) pour une maison. En effet, parmi 33 variables, 16 ont relation avec la circulation routière, et seulement 10 avec les questions environnementales dont 5 font référence au bruit et juste deux ont relation explicitement aux besoins de vie. Broadbent a qualifié cette liste de « déséquilibrée » en disant « *Je doute que un autre concepteur produirait une liste identique* »⁷¹.

Les critiques à l'égard de sa théorie ont donné naissance à « la ville n'est pas un arbre » (Alexander, 1966). Cette initiative est l'argument le plus puissant contre l'idée de « l'adaptabilité/inadaptabilité » qui était la base de son ouvrage « de la synthèse de la forme ». Alexandre lui-même (1971) a exprimé son dégoût à l'égard de l'approche globale de la synthèse de la forme qu'il l'a décrit comme « un malentendu douloureux »⁷².

○ **La méthode d'Archer (1965) :**

Une année après l'apparition de model d'Assimow, Bruce Archer (1965) a proposé un modèle de conception basé sur les mécanismes de la réponse biologique. Pour lui, il y a une similitude entre les mécanismes de la réponse biologique et ceux de la résolution des problèmes dans la programmation informatique et la conception. Archer a assimilé ce processus à la cybernétique en arguant : « *l'étude des mécanismes de contrôle des organismes vivants est appelé cybernétique. Ces derniers temps, les concepteurs des systèmes de contrôle très compliqués des machines-outils, avions, fusées et des instruments contrôlés à distance se sont tournés vers la cybernétique pour l'inspiration.* »

Archer a proposé cette méthode en tant que un terrain commun au sein de la science des méthodes de conception en stipulant, « *dans la pratique, les étapes se chevauchent et sont souvent confondues, avec des retours fréquents au début, lorsque des difficultés sont envisagées et des obscurités sont trouvées.* »⁷³

⁷⁰ Broadbent. J, Design in Architecture: architecture and the human sciences, David Fulton publishers, Great Britain,1988.

⁷¹ Ibid.

⁷² Ibid.

⁷³ Hugh. H, How do u design , Dubberly Design Office, San Francisco,USA,2004.P.98.

La méthode d'Archer comprend cinq étapes⁷⁴ : (fig.1.6)

- Briefing : le concepteur découvre ce que le problème est, et collecte des informations à son sujet y compris les besoins du client.
- Analyse : ranger les informations, ensuite les classifier et les mettre sous une forme utilisable.
- Synthèse : de nombreuses solutions au problème sont proposées.
- Evaluation : des solutions différentes sont examinées et testées, et l'une d'entre elles sera choisie pour le développement.
- Implémentation : schémas, dessins et présentations et tout autre matériel sont préparés pour que la conception puisse être mise dans la production.

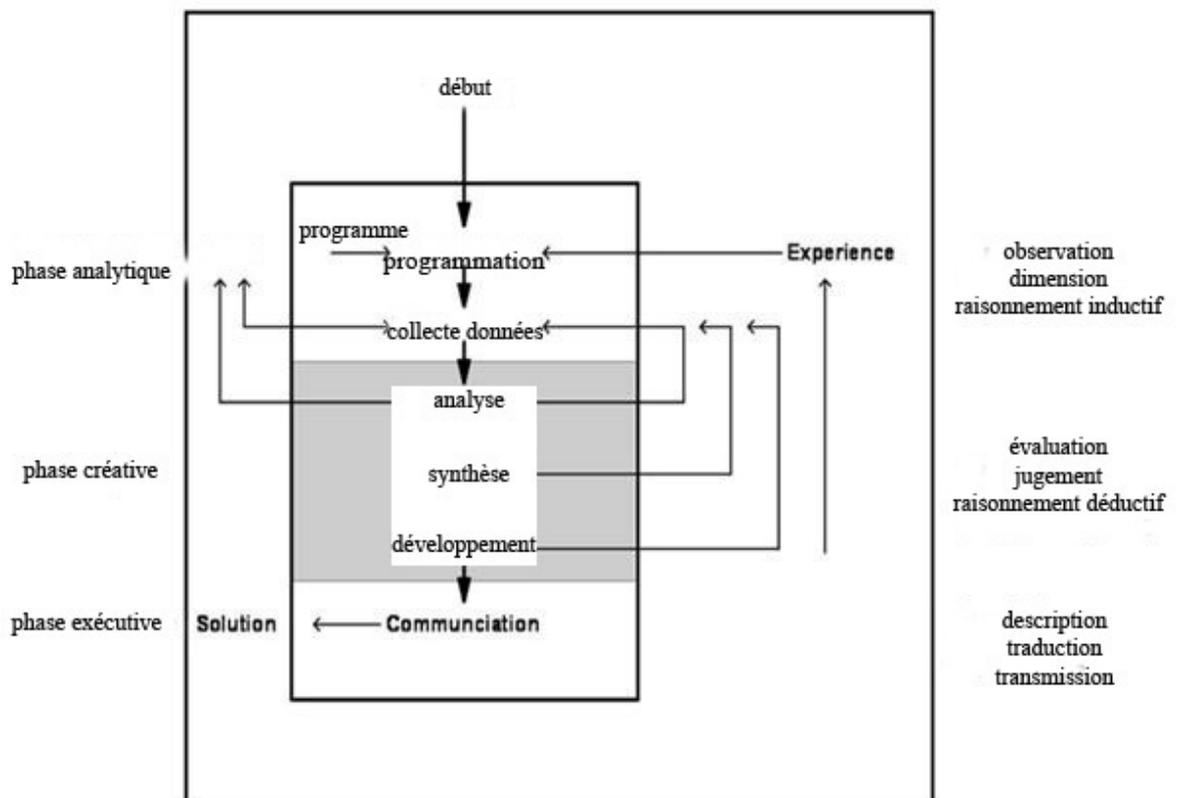


Fig.1.6 Le modèle d'Archer (1963 ,1964)

Source: Hugh (2004)

Archer (1965) a stipulé que les approches systématiques sont utiles sous les trois conditions suivantes : lorsque les conséquences de se tremper sont graves ; lorsque la

⁷⁴ Pedrini, A, Integration of low energy strategies to the early stages of design process of the office buildings in warm climates, Thèse de doctorat, University of Queensland, 2003.

probabilité de se tromper est élevée et lorsque le problème est complexe et caractérisé par de nombreuses variables en interaction⁷⁵.

○ **Le plan du travail « plan of work » proposé par RIBA (Royal Institute of British Architects) (1965):**

RIBA a proposé « le plan du travail » qui divise le processus de conception en différentes étapes. « Le plan de travail » est largement reconnu dans l'industrie de la construction au Royaume-Uni.

Le RIBA « plan of work » regroupe quatre phases comme suit :

- Briefing : collecte des informations sur le problème de conception (étape A et B)
- l'esquisse (sketches) : l'investigation de la nature du problème et les solutions possible (étapes C et D)
- les plans d'exécution (étapes E, F, H)
- les opérations sur chantier (étapes J, K, L, M)

Douze étapes de travail allant d'une étape de démarrage (idée préliminaire) où le premier contact avec le client a lieu à une étape de retour de l'information (feedback) à la fin du projet. (Tableau 1.4)

Markus a critiqué ce « plan of work » du fait qu'il a un caractère linéaire, séquentiel et non pas itératif. Pour lui l'inconvénient principal du processus de conception linéaire est la haute influence du client et de l'architecte sur la détermination des paramètres principaux de la conception et, de ce fait, les stratégies qui doivent être décidées dans les premières phases de la conception pourraient être sous-estimées⁷⁶.

Lawson a critiqué le « Plan of Work » du RIBA, sévèrement, parce qu'il est difficile dans ce modèle de savoir la quantité d'information suffisante pour passer de la phase première à la phase qui la suit. Pour lui, ce modèle est une description non du processus, mais du produit de ce processus, autrement dit, ce modèle ne nous dit pas comment l'architecte travaille mais plutôt, ce que le produit doit être à travers des plans et des croquis⁷⁷.

⁷⁵ Clarkson, J, et Eckert, C, Design process improvement :A review of current practice, Springer-Verlag, London, 2005.

⁷⁶ Lawson, B, How designers think, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.

⁷⁷ Ibid

Aussi, les concepteurs sont dans l'incapacité de faire face à la vaste masse de données qu'ils ont rassemblées. Pour ce faire, ils ont recours à leurs expériences qui sont considérées comme des stratégies non-systématiques de conception⁷⁸.

Work Stage	description
A: Inception (idée préliminaire)	Discute les exigences du client comprenant le calendrier et les limites financières ; évaluer ces derniers et donner les conseils généraux sur la façon de procéder.
B: Feasibility (faisabilité)	Effectuer une étude pour déterminer la faisabilité des exigences du client.
C: Outline (proposition d'une esquisse)	Analyser les exigences du client ; proposer une esquisse et une approximation du coût de construction.
D: Scheme (avant-projet)	Élaborer une conception d'avant-projet précise pour illustrer des arrangements, les matériaux et l'aspect spéciaux.
E: Detail (détail d'excursion)	Fournit les détails de la conception
F and G: Production and Bills (production et devis)	Préparer l'information produite (schémas, matériaux, exécution) ; préparer les devis quantitatifs.
H: Tender (soumission)	Inviter les entrepreneurs
J: Project Planning	la nomination de l'entrepreneur.
K: Operation on site	Administrer la manœuvre sur le chantier de construction.
L: Completion (parachèvement)	Les conseils à l'entretien, fournit des schémas et les plans au client, y compris des installations de service.
M: Feedback (retour)	Les occupants évaluent le bâtiment.

Tableau 1.4 RIBA plan of work. Réadapté par auteur
Source : Morbitzer, C, A. (2003)

Austin, Baldwin et autres (1999) ont combiné le niveau du détail dans « le plan of work » de RIBA avec les liens de l'information pour réaliser des modèles détaillés des différentes étapes du processus de conception du bâtiment en utilisant les diagrammes de l'écoulement des données. Ces derniers permettent à un modèle d'être divisé à partir d'une vue d'ensemble puis décomposé pour indiquer les détails les plus fins (fig1.7). Parmi beaucoup de méthodologies de modélisation, les auteurs ont opté pour IDEF0⁷⁹. Leur méthode se compose de l'identification de l'hierarchie du processus de conception, la détermination de l'information requise pour les tâches, la production des diagrammes du modèle du processus de conception et leur vérification⁸⁰.

⁷⁸ Broadbent. J, Design in Architecture: architecture and the human sciences, David Fulton publishers, Great Britain, 1988.

⁷⁹ IDEF0 : est une dérivation d'IDEF (Integrated DEFinition Language) qui a été créé dans les années 70 pour l'usage dans l'industrie aérospatiale des USA, pour améliorer la communication et analyser la fabrication afin d'améliorer la productivité.

⁸⁰ Pedrini. A, Integration of low energy strategies to the early stages of design process of the office buildings in warm climates, Thèse de doctorat, University of Queensland, 2003.

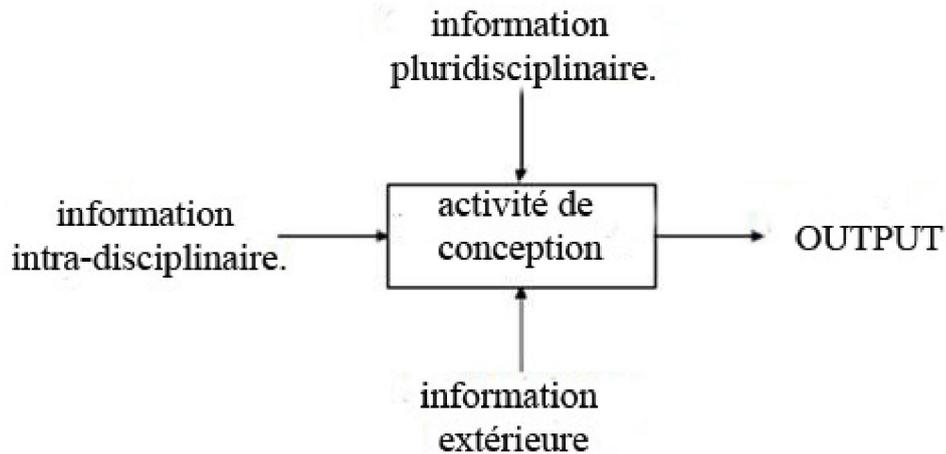


Fig.1.7 IDEF0 modified (IDEF0v).
Source: Pedrini (2003)

○ **la méthode de Gordon Best (1967) :**

Gordon Best, un jeune chercheur au colloque de Portsmouth en 1967, a présenté un modèle de résolution de problème qu'il a qualifié de « *design variety restriction* » (fig.1.8). Pour lui, le concepteur devait trouver une solution de conception après un ensemble d'opérations interprétatives entrelacées et une structuration de l'information⁸¹.

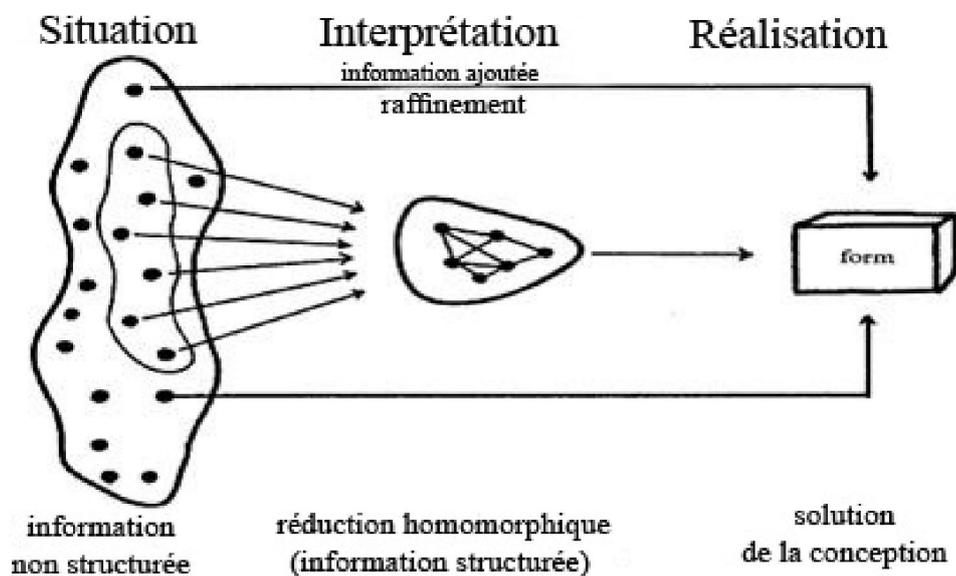


Fig.1.8 le modèle de Gordon Best (1967)
Source: Chupin, J. P (2011)

⁸¹ Chupin. J.P, Judgement by design: “Towards a model for studying and improving the competition process in architecture and urban design”, *Scandinavian Journal of Management*, 2011, 27, 173-184.

○ **La méthode de Foreman (1967) :**

Foreman (1967) a considéré aussi le processus de conception comme un processus de résolution de problème. Il a introduit l'idée de « besoins », ensuite subdivisé le processus⁸². (fig.1.9)

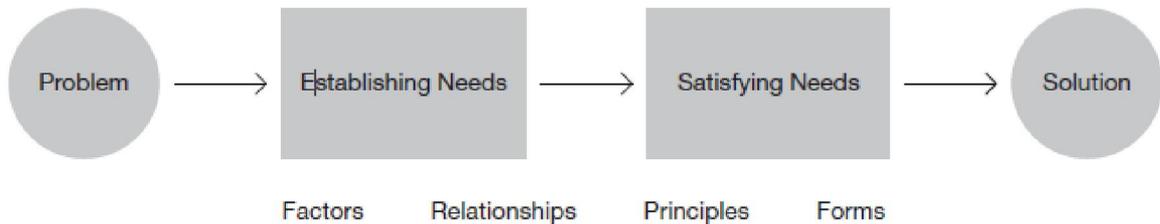


Fig.1.9 Le model de Foreman (1967)
Source: Hugh (2004)

○ **La méthode de Thomas et Maver :**

Thomas A. Marcus (1969) et Thomas W Maver (1970) ont proposé un modèle différent des méthodes précédentes qui ont suivi un chemin linéaire. Selon eux, le processus de conception est une série de décisions ayant une structure itérative. Ils ont divisé ce processus de décision en trois niveaux⁸³. (fig.1.10)

- 1- Outline proposals (proposition de l'esquisse)
- 2-Scheme design (avant-projet)
- 3-Detail design (plans d'exécution)

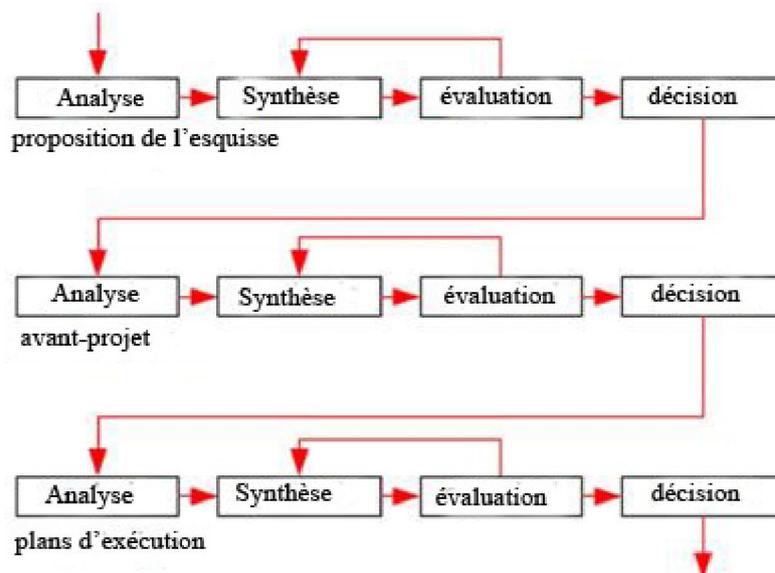


Fig.1.10 Le model de Marcus (1969) et Maver (1979). Source: Pedrini, A (2003)

⁸² Hugh. H, How do u design , Dubberly Design Office, San Francisco,USA,2004.

⁸³ Ibid

Dans ce modèle, chaque niveau comprend l'analyse, la synthèse, l'évaluation et la décision et il y a des feedbacks qui appellent le concepteur d'avoir une idée nouvelle, si la précédente s'avère inadéquate. La présence de cette boucle de retour dans le diagramme rend le processus de conception plus fonctionnel.

Pour Lawson (2005), ce modèle a commencé par des propositions de l'esquisse pour arriver aux détails d'exécution et cela n'est plus souvent le cas dans la conception où le problème n'est pas totalement abordé. John Page (1963) a stipulé dans la Conférence sur les méthodes de conception tenue à Manchester en 1962 « *dans la majorité des situations de conception pratique, (...), vous vous rendez compte que vous avez oublié d'analyser autre chose, et vous devez contourner le cycle et produire une synthèse modifiée, et ainsi de suite*⁸⁴ ». Lawson est arrivé inévitablement à la conclusion que la méthode devrait en fait montrer une boucle de retour de chaque fonction à toutes les fonctions précédentes.

Cependant, cette approche s'avère plus appropriée dans le domaine de l'architecture et de la planification que dans le domaine de l'engineering et le design industriel. De ce fait, une nouvelle méthodologie des méthodes de conception a émergé⁸⁵.

I.3.2.2 Critique générale des méthodes de la première génération :

Les méthodes de la première génération ont été critiquées par beaucoup de théoriciens y compris les premiers pionniers. Alexander (1971) a dit « *Je me suis dissocié du champ* ». Pour lui, il y avait peu d'informations utiles pour dire comment concevoir des bâtiments dans ce qui s'appelle les « méthodes de conception ». Jones a déclaré également « *Dans les années 70, j'ai réagi contre les méthodes de conception. Je déteste le langage de la machine, le behaviorisme, la tentative continuelle pour mettre toute la vie dans un cadre logique* »⁸⁶.

« *Les méthodes proposées à la conférence des méthodes de conception étaient simplistes. Chacun systématisait sa propre approche de conception, et l'extériorisait comme méthode de conception...*⁸⁷ ». En outre, le caractère linéaire de ces méthodes les a rendues moins pratiques parce qu'on ne peut pas savoir la quantité d'informations suffisante pour passer d'une phase à une autre⁸⁸. Les concepteurs ne peuvent pas faire face à la grande masse de données qu'ils ont rassemblées pendant la phase d'analyse et par conséquent, ils ont

⁸⁴ Lawson. B, How designers think, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.

⁸⁵ Cross, N, "Science and Design Methodology": A Review, Research in Engineering Design, 1993, 5:63-69.

⁸⁶ Cross, N, "Forty Years of Design Research", Design Research Society, Wonderground 2007 Plenary, P.3.

⁸⁷ Bayazi, N, "Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research", Design Issues: Volume 20, Number 1, P. 19, 2004.

⁸⁸ Lawson. B, How designers think, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.

recours à leurs expériences personnelles. Ces dernières sont considérées comme des stratégies non-systématiques de conception. Concernant l'étape d'analyse, les architectes préfèrent se concentrer sur une solution correcte trouvée par une inspiration soudaine plutôt que faire face à beaucoup de solutions. L'étape d'évaluation également souffre de l'information excessive et peut devenir une tâche déroutante⁸⁹.

Bamford (2001), a remis en question également l'idée des méthodes cartésiennes sous prétexte que la totalité contrôle les parties et non pas le contraire⁹⁰.

De plus, la plupart des études sur le processus de conception dans l'architecture prouvent qu'il ne suit pas des règles rigides. Les concepteurs n'appliquent pas des méthodes universelles et extériorisent rarement leurs pensées (Kowaltowski et autres 2006a)⁹¹.

Le caractère ouvert du processus de la conception est une raison de plus que le processus de la conception n'est pas un processus rationnel de résolution de problème comme stipule Boudon et al (1994) « *C'est grâce au caractère ouvert de l'idée – c'est-à-dire donnant lieu à plusieurs possibles – que l'architecte peut effectuer des choix qui ne seront pas nécessairement arbitraires. En ce sens, un parti architectural trace des directions, mais il fixe également des limites à la liberté totale* »⁹².

Il avait été prouvé également que ces méthodes qualifiées de « rationnelles » sont partiellement rationnelles car le processus de conception comprend des activités mentales qui sont pour la plupart du temps basées sur des valeurs subjectives, des croyances, et des préférences comme stipule Rittel (1971) : « *si quelqu'un essaye d'être rationnel [...] il n'y a aucun début et aucune fin au raisonnement. [...] plus quelqu'un essaye d'anticiper et justifier des actions plus il devient difficile pour agir* »⁹³.

Horst Rittel a prouvé qu'il y avait des aspects de problème de conception qui étaient insolubles dans la première génération de méthodes de conception. Par exemple, il n'y a aucune formulation définitive des problèmes vicieux « wicked ». Les sciences cognitives ont développé une vue du raisonnement humain « l'esprit incarné » qui mène à beaucoup de conclusions étroitement liées à celles de Rittel. Selon cette acception, le raisonnement est inconscient et émotionnel. Autrement dit, la raison humaine dépend et résulte de la

⁸⁹ Broadbent. J, Design in Architecture: architecture and the human sciences, David Fulton publishers, Great Britain, 1988.

⁹⁰ Pedrini. A, Integration of low energy strategies to the early stages of design process of the office buildings in warm climates, Thèse de doctorat, University of Queensland, 2003.

⁹¹ Kowaltowski et al, Methods that may stimulate creativity and their use in architectural design education, Int J Technol Des Educ, Springer Science+Business Media B.V. 2009.

⁹² Boudon. P, et al, Enseigner la conception architecturale, Paris, La Villette, 1994).

⁹³ Dehlinger. J et Dehlinger. H, Architecture, design methods and Inca structures :Festschrift for Jean-Pierre protzen, Kassel university press, 2009.

structure du corps humain et du cerveau. Les idées et les suppositions de Rittel sont largement reconnues par beaucoup de théoriciens comme Donald Schön qui a proposé la notion de la rationalité technique dans son ouvrage « the reflective practionner » (Schön, 1983) et George Lakoff (2008) qui a introduit la notion de la raison d'éclaircissement « Enlightenment reason ».⁹⁴

Papamichael et Prozen (1993) dans leur ouvrage « The Limits of Intelligence in Design » ont suivi les pas de Schön et Rittel. Ils ont stipulé que la conception implique la sensation et la réflexion pendant l'action « feeling and thinking while acting ». Pour eux, la conception est partiellement rationnelle. Ils ont réclamé que les décisions de conception ne sont pas entièrement le produit du raisonnement, mais plutôt, elles sont basées sur les jugements qui se rapportent à la notion de « bon » et « mauvais ». Pour eux ces jugements sont attribués aux sentiments, plutôt que aux pensées⁹⁵.

Selon Coyne (2005), les méthodes de la première génération sont encore utilisées dans les écoles d'architectures malgré les critiques sévères à leur égard à cause de leur caractère facile à être opérationnalisé⁹⁶.

I.3.2.3 La deuxième génération des méthodes de conception :

Vers la fin des années 70, la méthodologie de la conception architecturale a connu un changement de paradigme « paradigme shift ». Broadbent a annoncé l'apparition « d'une nouvelle génération des méthodes de conception » basées sur les concepts de Popper mais c'était exactement en 1972 quand Hillier, Musgrove et O' Sullivan ont publié leur essai séminal intitulé « Knowledge and Design »⁹⁷.

- **la méthode de conjecture /Analyse, Hiller et al (1972) :**

Popper (1965) a stipulé que la méthode inductive basée sur beaucoup d'observations n'est pas suffisante pour arriver aux hypothèses et aux conjectures. Selon lui, « *on commence par des conclusions. Puis on teste ces conclusions pour voir si elles étaient fausses. Si les observations prouvent qu'elles sont fausses, à ce moment la nous pouvons abandonner ce*

⁹⁴ ibid

⁹⁵ Andresen, I, A Multi-Criteria Decision-Making Method for Solar Building Design, Thèse de doctorat, the Norwegian University of Science and Technology, 2000.

⁹⁶ Dehlinger. J et Dehlinger. H, Architecture, design methods and Inca structures :Festschrift for Jean-Pierre protzen, Kassel university press,2009.

⁹⁷ Anay. H, Two evolutionary models for reconceptualizing architectural ideas and the architectural design process, Thèse de doctorat, Middle east technical university,2008.

qui a été proposé»⁹⁸. C'est une activité de « conjecture » et « réfutation » ou essais et erreurs.

Hillier, Musgrove et O' Sullivan prennent l'idée de Popper pour développer leur modèle de conception. Pour eux, une fois le problème est cité, il y a une variété de solutions possibles « conjectures ». L'une de ses solutions sera la solution finale après un processus de raffinement et de réductions.

○ **Le générateur primaire, Darke (1979) :**

En se basant sur l'idée de la conjecture de Popper (1964) et les études de Hillier, Musgrove et O'Sullivan (1972)⁹⁹, Darke (1979), a pris et développé le modèle de « conjecture/analyse » en proposant la notion du « générateur primaire ». L'introduction de cette notion a transformé le modèle de « conjecture/analyse » en « générateur/conjecture/analyse ». Le générateur primaire sert comme un moyen de conceptualisation d'une étape particulière qui précède une conjecture dans le processus de la conception architecturale¹⁰⁰, (fig1.11).

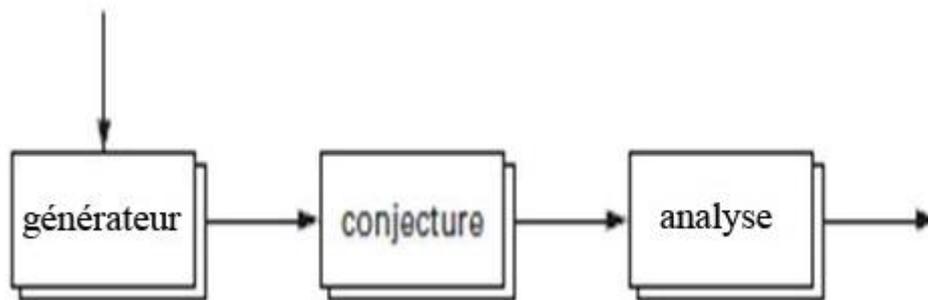


Fig.1.11 La méthode du générateur primaire de Jane Darke
Source: Lawson, B. (2005)

Pour Darke, le concepteur ne commence pas l'étude d'une liste explicite des facteurs des problèmes et des objectifs envisagés par la conception, mais plutôt il essaye de ramener l'ensemble des solutions possibles à une classe plus petite plus maniable et manipulable¹⁰¹. Darke a stipulé que « ... une idée très simple est utilisée comme un moyen pour réduire le nombre des solutions possibles pour que le concepteur puisse construire et analyser rapidement le plan »¹⁰². Pour réaliser cela, un sous-ensemble d'objectifs est choisi, basé sur une expérience antérieure des problèmes semblables et du jugement subjectif. Darke a

⁹⁸ Ibid

⁹⁹ Lawson, B, How designers think, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.

¹⁰⁰ Any, H, Two evolutionary models for reconceptualizing architectural ideas and the architectural design process, Thèse de doctorat, Middle east technical university, 2008.

¹⁰¹ Clarkson, J, et Eckert, C, Design process improvement : A review of current practice, Springer-Verlag, London, 2005.

¹⁰² Lawson, B, How designers think, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.

nommé le sous-ensemble « le générateur primaire » ! qui mène à une solution possible ou à une conjecture.

Lawson (1979) a analysé le générateur primaire de Darke à travers une étude comparative des stratégies de résolution de problème suivies par deux groupes des étudiants de la post-graduation. Le premier groupe a étudié des filières scientifiques alors que le deuxième groupe a étudié l'architecture. Le problème proposé par Lawson s'agissait de l'arrangement des blocs colorés 3D afin de satisfaire certaines règles (certaines règles n'étaient pas révélés inutilement). Les deux groupes ont montré des stratégies différentes de résolution du problème. Les scientifiques ont généralement adopté une stratégie d'exploration des combinaisons possibles des blocs, systématiquement, afin de découvrir la règle fondamentale qui permettrait une combinaison admissible. Les architectes ont proposé une série de solutions, puis ils ont éliminé quelques solutions jusqu'à trouver une solution acceptable¹⁰³.

La différence entre le générateur primaire de Dark et la première image conceptualisée- la conjecture dans le sens de Hillier et autres - est le fait que le premier ne se rapporte pas à cette image mais aux idées qui l'ont produit. Darke a suggéré que dans la création d'une conception architecturale, il y a une idée (ou plusieurs) qui précède et informe la conjecture initiale (ou la conjecture) et que cette idée opérationnelle intervient dans tout le processus de la conception architecturale et non seulement à l'étape initiale. Par conséquent, avec l'introduction du générateur primaire, le schéma original de la conjecture/analyse ne devrait pas être transformé en analyse de générateur /conjecture/analyse comme il était suggéré, où le générateur représente une étape procédurale distincte ou une étape qui réside au début du processus. Le processus devrait demeurer comme conjecture/analyse où un ensemble de « générateurs » sont toujours opérationnels dans tout le processus entier.¹⁰⁴ Plusieurs chercheurs ont soutenu l'idée du générateur primaire et parmi eux Rowe (1987) qui a utilisé l'observation et l'analyse expérimentales des schémas produits par des concepteurs¹⁰⁵.

Mazouz et Zerouala (2001) ont stipulé que le modèle de Hillier et al est moins fonctionnel et opérationnel parce qu'il ne montre pas les outils et le processus qui mènent à une

¹⁰³ Nigel.C, *Designerly Ways of Knowing*, Birkhäuser,2007.

¹⁰⁴ Anay. H, *Two evolutionary models for reconceptualizing architectural ideas and the architectural design process*, PhD thesis, Middle east technical university, 2008.

¹⁰⁵ **Lawson**. B, *How designers think*, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.

conjecture. De ce fait, ils ont ajouté une étape d'analyse qui précède la conjecture¹⁰⁶. (fig1.12)

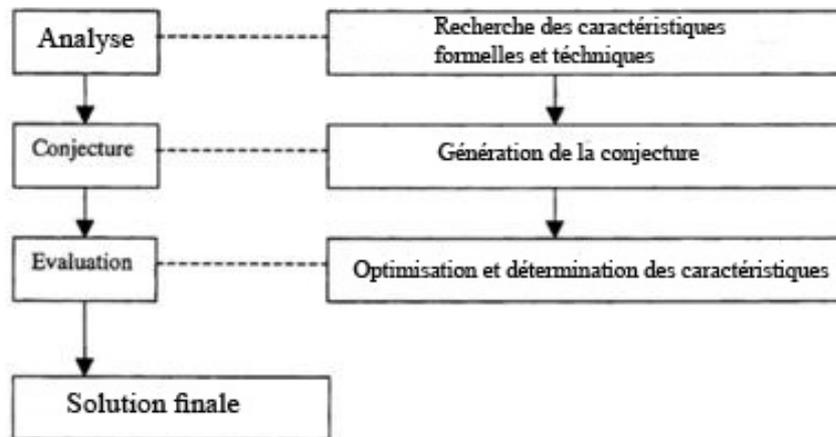


Fig.1.12 Le modèle de Mazouz et Zerouala.
Source : Mazouz et Zerouala (2001)

○ **La méthode de Mars (1984)**¹⁰⁷ :

Mars (1984) a proposé un modèle axé sur la solution. Ce modèle est particulièrement intéressant pour le raisonnement dans la conception. Il s'appelle le modèle de la « production-déduction-induction » (PDI). En se basant sur la philosophie de Peirce (1923), Mars a stipulé que les deux formes conventionnelles du raisonnement (la déduction et l'induction) peuvent seulement décrire les aspects évaluatifs et analytiques de la conception. De ce fait, il a proposé une troisième forme de raisonnement inventé par Peirce, « le raisonnement abductif ou productif », qui est responsable des activités créatrices essentielles. À partir de cela il a développé le modèle d'activité triple représenté dans la figure (1.13).

Dans la première phase du raisonnement productif, le concepteur se base sur l'énoncé du problème vague et sa connaissance existante pour concevoir une solution. Dans la deuxième phase, la déduction, basée sur la compréhension des principes physiques principaux, est employée pour analyser ou prévoir le comportement du système. Dans la troisième phase, le raisonnement inductif est employé pour identifier les moyens possibles pour améliorer l'exécution en changeant certains aspects de la conception, ce qui conduit à la production d'une meilleure solution. En commun avec d'autres modèles axés sur la

¹⁰⁶ Mazouz, S et Zerouala. , the integration of environmental variables in the process of architectural design: the contribution of expert systems, *Energy and Building*, 33,2001,699-710.

¹⁰⁷ Clarkson, J, et Eckert, C, *Design process improvement: A review of current practice*, Springer-Verlag, London, 2005.

solution, la nature fortement cyclique de la conception a été donné une importance primaire.

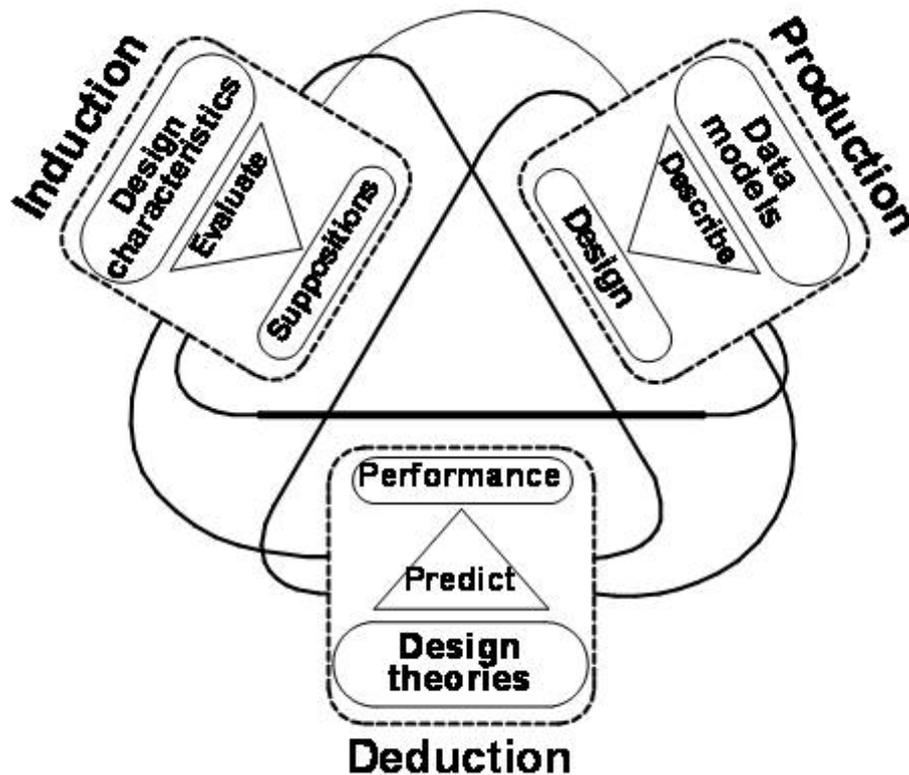


Fig.1.13 Le modèle PDI de raisonnement dans la conception (March, 1984)
Source : Clarkson, J. et Eckert, C (2005)

○ **Le modèle de Zeisel (1981) :**

Un autre modèle a été proposé par John Zeisel en 1981 et republié encore une fois en 2006 dans un cadre théorique behaviouriste. Ce modèle est basé sur un lexique inspiré par la neurologie. Il est le résultat d'une synthèse de plusieurs modèles spirales qui ont apparus dans l'histoire de 50 ans de la modélisation de la conception. (fig1.14).

En regardant étroitement le diagramme, nous pouvons voir qu'il illustre des séries d'itérations, débutant de l'image initiale, où il tourne autour d'un domaine de réponses acceptables. Le modèle n'est pas linéaire, il y a un point de départ et un point d'arrivée, mais il y a également des moments durant lesquels le concepteur peut régresser, retourner et réfléchir. Il peut aller en arrière, mais en réalité, il a néanmoins fait un progrès dans sa compréhension de la situation tant que le spirale n'est pas bidimensionnel mais tridimensionnels « un hélicoïde »¹⁰⁸.

¹⁰⁸ Chupin, J.P, Judgement by design: "Towards a model for studying and improving the competition process in architecture and urban design", *Scandinavian Journal of Management*, 2011, 27, 173-184.

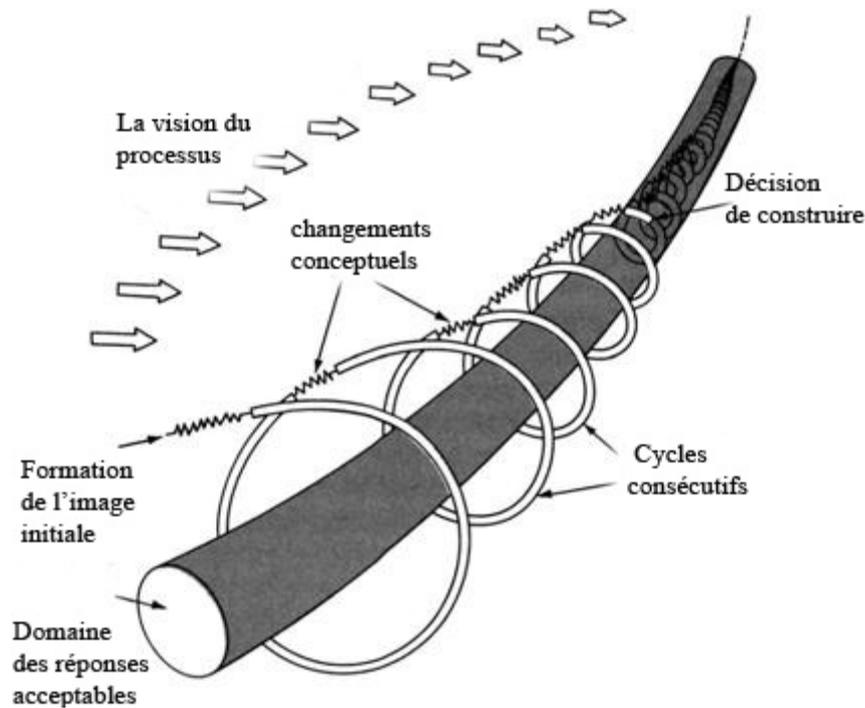


Fig.1.14 Le modèle en spirale de Zeisel (1981). Republié en 2006.
Source: Chupin, J. P (2011).

I.3.2.3-A Les méthodes systématiques :

Une nouvelle génération des méthodes de conception « méthodes systématiques » a été proposée particulièrement en Allemagne par Hubka (1982), Pahl et Beitz (1984), Verein Deutscher Ingenieure « VDI » (1987)¹⁰⁹ comme stipule Vladimir Hubka et Ernst Eder (1996) « *La première évidence du changement provient de la période de la deuxième guerre mondiale, et la période de la reconstruction et de la construction* »¹¹⁰.

La théorie de la conception systématique a essayé de développer différentes méthodes pour trouver des solutions avec des conclusions logiques. La conception systématique a pour objectif le développement des méthodes, des procédures et des moyens pour aborder les problèmes compliqués. (Pahl et Beitz, 1990)¹¹¹.

Le processus de conception, selon la conception systématique, c'est la transformation du problème défini en une description d'un système technique pour arriver à une certaine structure et hiérarchie où les composants et les problèmes sont résolus. (Hubka et Eder 1992)¹¹².

¹⁰⁹ Ibid

¹¹⁰ Bayazi, N, « Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research », *Design Issues*: Volume 20 , Number 1, 2004.

¹¹¹ Haapasalo, H, *Creative computer aided architectural design: An internal approach to the design process*, Department of Industrial Engineering, Academic Dissertation, University of Oulu, Finland.2000.

¹¹² Ibid

La méthode la plus connue est celle de Pahl et Beitz (1996) destinée à la conception mécanique (fig1.15).

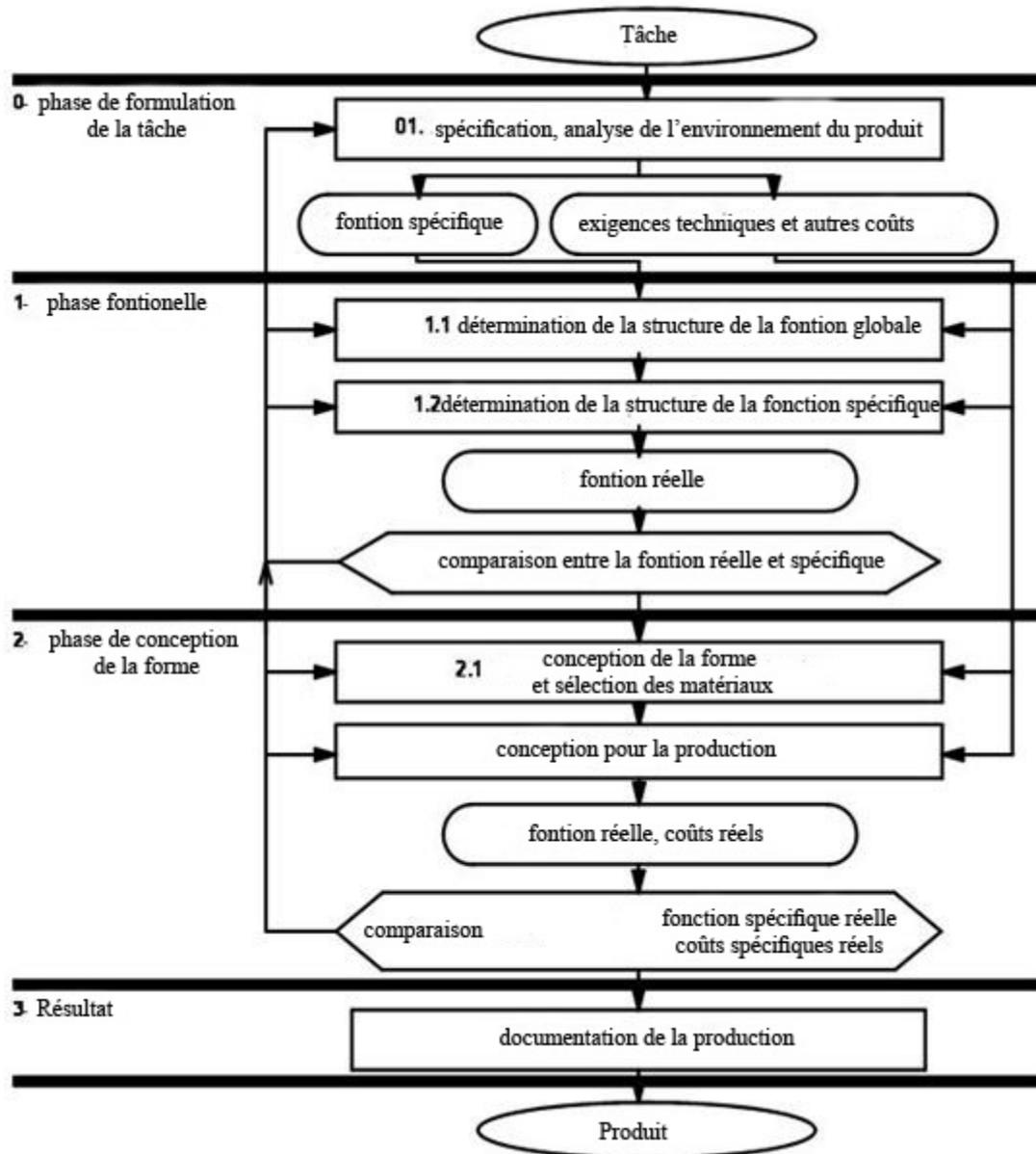


Fig.1.15 Les phases de la conception systématique (Pahl & Beitz 1990).

Source: Haapasalo, Harri (.2000)

La méthode prescrit quatre phases, chacune de ces quatre phases prescrites se compose d'une liste d'étapes. Pahl et Beitz ont stipulé que si on suit les étapes prescrites aucun élément essentiel ne pourrait être négligé, ce qui mène vers à l'établissement d'un programme plus précis ayant pour résultat des solutions qui peuvent être réutilisées facilement¹¹³.

¹¹³ Clarkson, J, et Eckert, C, *Design process improvement :A review of current practice*, Springer-Verlag, London, 2005.

Pahl et Beitz (1996) croient que le problème qui représente un challenge dans la conception est envisagé quand on fait le saut créatif entre la définition du problème et la solution¹¹⁴. La prise de décision dans le processus de conception systématique contient des boucles (Fig1.16). Ces derrières sont combinées comme une entité, qui se compose de petites étapes en avant et en arrière au long du processus de conception (Pahl et Beitz 1990)¹¹⁵.

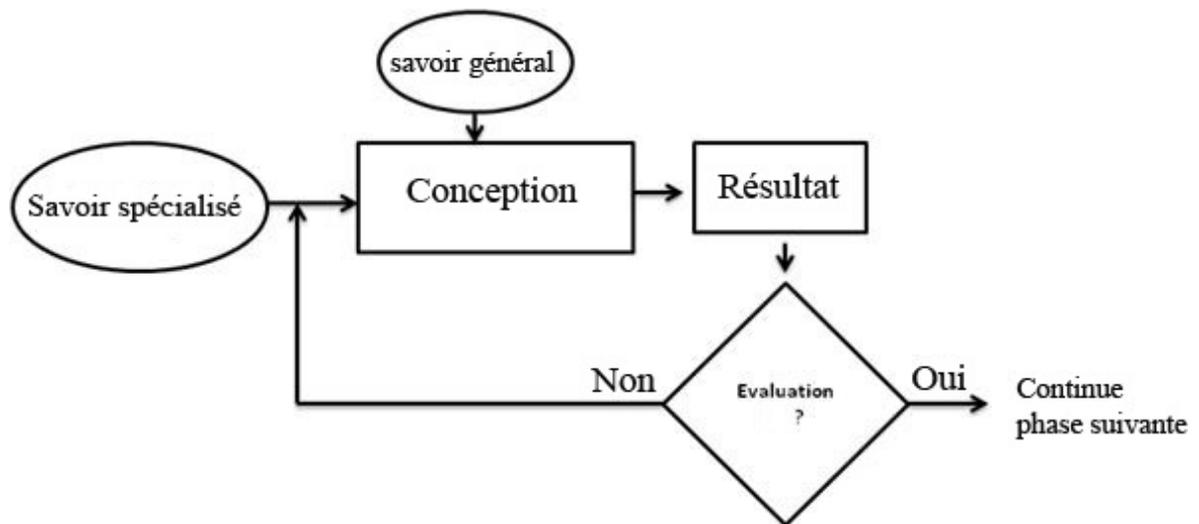


Fig.1.16 : La boucle de conception
Source: Haapasalo, Harri (2000)

Hubka (1982) a développé la méthode de la décomposition fonctionnelle par la considération des « organes » - par analogie aux systèmes biologiques- comme partie intégrante du processus de conception mécanique. Les organes décrivent la relation complexe entre les fonctions et leurs composantes. Hubka a décrit les organes comme les groupes des composantes physiques qui performent une collections de fonctions où les caractéristiques principales de chaque organe sont les espaces, les surfaces ou les lignes qui représentent les emplacements où les effets nécessaires ont lieu. Andreasen et al (1997) ont adopté une approche similaire à celle de Hubka dans leur théorie des domaines, dans laquelle les artefacts technologiques sont représentés par quatre perspectives structurales : le principe technologique, les fonctions, les organes et des parties physiques¹¹⁶.

Une approche différente de celle de Hubka et Andreasen et al basée sur la théorie des systèmes a été proposée par Kusiak (1999). Kusiak s'est basé sur les travaux d'auteurs

¹¹⁴ Ibid.

¹¹⁵ Haapasalo, H, Creative computer aided architectural design: An internal approach to the design process, Department of Industrial Engineering, Academic Dissertation, University of Oulu, Finland, 2000.

¹¹⁶ Clarkson, J, et Eckert, C, Design process improvement :A review of current practice, Springer-Verlag, London, 2005.

comme Simon (1996). Ce dernier a stipulé que le comportement complexe des systèmes tels que les produits mécaniques n'a pas une propriété holistique mais résulte plutôt des interactions rationnelles entre les sous-systèmes. Cette approche a été remise en cause par Hubka (1982; Hubka and Eder, 1988) du fait qu'elle est très réductionniste et simpliste.

« Quality Function Deployment » (QFD) est un outil de planification où les besoins du client sont transformés en dispositifs, accessoires et aspects dans les produits finaux (voir fig.1.17).

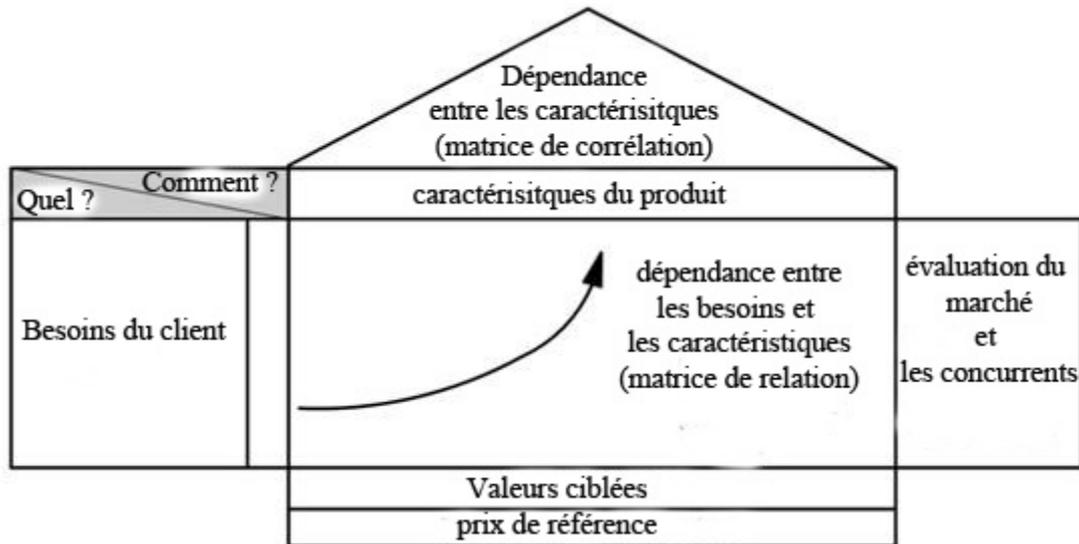


Fig.1.17 Contenus des salles dans la maison de la qualité (Akao 1990, Ekdahl 1997).

Source: Haapasalo, Harri. (2000)

Malgré le fait que la méthode était proposée pour le développement des produits, elle est considérée comme un bon exemple des méthodes systématiques et qui peut s'appliquer dans d'autres domaines. Elle vise à atteindre des produits de haute qualité par la prise en compte de chaque décision sur la base de faits réels. QFD est un processus composé de plusieurs étapes où des symboles et des matrices sont exploités (Akao 1990, Turunen 1992). QFD contient beaucoup de décisions, et beaucoup de ces dernières doivent être basées sur des évaluations subjectives (fig.1.18). Selon Lakka et autres (1995), QFD est un outil efficace pour l'assemblage des itérations directes systématiquement. Cependant, il a présenté des lacunes dans la conception préliminaire d'un appartement. Outre la complexité, il y avait des difficultés pour manipuler et différencier les besoins et des dispositifs (solutions)¹¹⁷.

¹¹⁷ Haapasalo, H, Creative computer aided architectural design: An internal approach to the design process, Department of Industrial Engineering, Academic Dissertation, University of Oulu, Finland.2000.

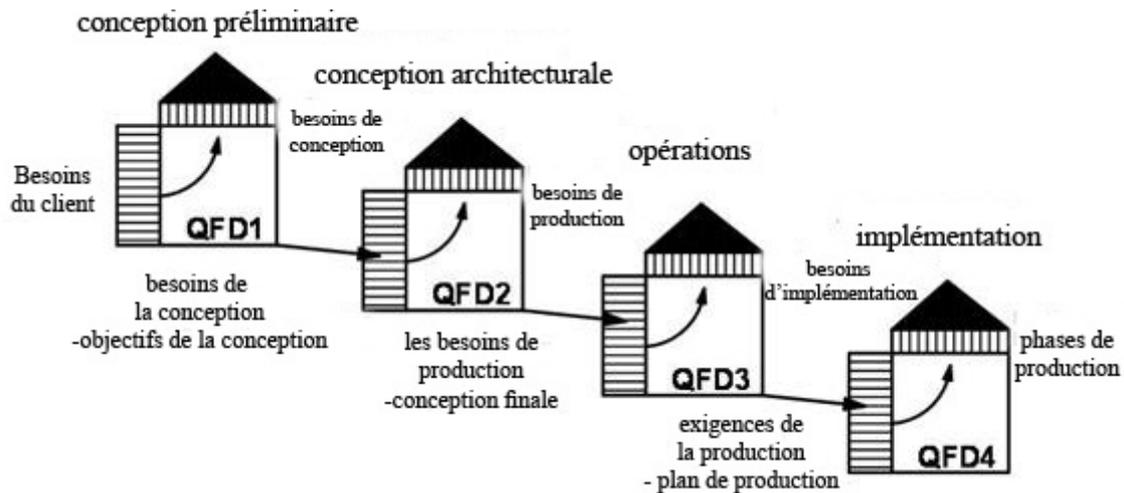


Fig.1.18 Application de QFD à la conception architecturale et au projet de construction (Ekdahl 1997, Lakka et autres 1995, Turunen 1992). Source: Haapasalo, Harri (2000)

I.3.2.4 Critiques des méthodes de la deuxième génération :

Selon Dorst et Dijkhuis, malgré le fait que les méthodes de la deuxième génération ont introduit le lien entre le processus de conception et le contenu (ce qui n'est pas le cas dans les méthodes de la première génération), le caractère dialectique de la conception comme une conversation réflexive perd la clarté et la rigueur du paradigme de la résolution rationnelle du problème¹¹⁸. En outre, les théories qui traitent les méthodes de la deuxième génération ne montrent pas comment elles peuvent se convertir en des plans d'actions.

D'autres chercheurs stipulent que le bâtiment n'est pas lui-même un problème qui a besoin d'une résolution (Bamford 2002, 252). De même qu'il n'est pas une conjecture qui peut être testée ou réfutée. Baser la théorie de conception sur des paradigmes inadéquats de la logique et de la science est une erreur selon Lionel March (1976, 266), du fait que la logique s'intéresse à des formes abstraites alors que la science étudie les formes existantes. La conception pour lui, cherche des formes nouvelles. En outre, le bâtiment ne peut pas être une hypothèse tant que ce dernier fait parti du monde des idées et elle ne sera jamais compréhensible¹¹⁹.

I.3.2.5 Vers une nouvelle génération des méthodes qui combinent entre la première génération (paradigme de résolution de problème) et la deuxième génération (réflexion dans l'action) :

¹¹⁸ Laaroussi, A, *Assister la Conduite de la Conception en Architecture: Vers un système d'information orienté*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.

¹¹⁹ Anay, Hakan, *Two evolutionary models for reconceptualizing architectural ideas and the architectural design process*, PhD thesis, Middle east technical university, 2008.

○ **Le modèle de Gero :**

Gero et Kannengiesser (Gero, 1990 ; Gero et Kannengiesser, 2002), ont stipulé l'existence de trois classes de variables¹²⁰ :

- les variables fonctionnelles (une fonction qui corresponde au but de l'objet).
- les variables comportementales (le comportement est défini par Gero comme étant l'effet de l'interaction d'un objet avec son environnement).
- les variables structurelles. (une structure est la configuration, l'organisation et la forme des composantes de l'objet et leurs relations).

Selon ce modèle, le but de la conception est de transformer la fonction en une description de conception de telle manière que la structure de l'objet conçu est capable de produire la fonction prévue. Les transformations incluses dans ce modèle élargissent la séquence « analyse-synthèse-évaluation » des modèles précédents en ajoutant trois étapes supplémentaires « formulation- reformulation-documentation.»¹²¹

La première étape dans la séquence est « la formulation ». C'est l'étape dans laquelle la fonction se transforme en comportements de la structure, qui sont prévus pour permettre cette fonction. Cependant, une fois ces structures produites et évaluées, d'autres comportements pourraient se produire ; ce qui conduit à une « reformulation » de la structure et/ou le comportement prévu. La dernière étape est celle de « la documentation » dans laquelle une transformation de la structure en des instructions prévues a lieu pour sa mise en application dans le monde. La figure (1.19) montre les différentes phases du processus de résolution du problème. La Figure (1.20) représente le modèle avec toutes les transformations qui ont lieu.

¹²⁰ Laaroussi. A, Assister la Conduite de la Conception en Architecture: Vers un système d'information orienté, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.

¹²¹ Dehlinger. J et Dehlinger. H, Architecture, design methods and Inca structures :Festschrift for Jean-Pierre protzen, Kassel university press,2009.

Phases	DOF
formulation	↑
analyse	↓
synthèse	↑
évaluation	↑↓
reformulation	↑
documentation	↑

Fig.1.19 processus de l'information dans le model de Géro
 Source : Dehlinger, J et Dehlinger, H (2009)

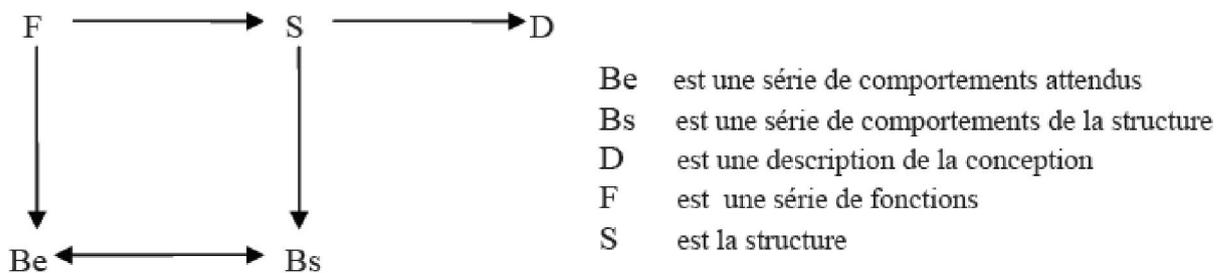


Fig.1.20 les différentes transformations dans le modèle de Géro
 Source : Laaroussi, A (2007).

Il est à noter que jusque là, le modèle fait partie du paradigme de résolution de problème. En se basant sur le principe de réflexion dans l'action de Schön, Gero a ajouté à son modèle le concept de « situatedness » au niveau de la phase de reformulation qui correspond à l'interaction entre l'architecte et la représentation de sa conception en cours de développement. C'est cette interaction qui détermine la trajectoire de la conception. La première reformulation est présentée dans la fig.1.21 où S' représente la nouvelle structure. La situation dans cette phase joue un rôle de fournisseur des opportunités pour établir une nouvelle structure de variables.

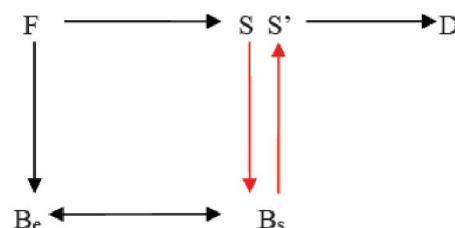


Fig.1.21 Reformulation 1 : Transformer S en S' est basé sur la situation
 Source : Laaroussi, A (2007).

Les différentes reformulations qu'on a vu précédemment sont présentées dans les figures ci-dessous après avoir ajouté le concept de « situatedness »¹²². La figure (1.22) représente la seconde reformulation qui implique la notion de "situatedness" et finalement la figure (1.23) représente la dernière reformulation.

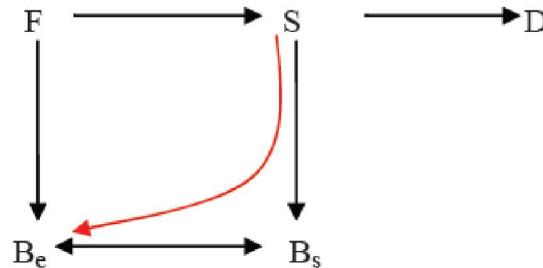


Fig.1.22 Reformulation 2 : Transformer les comportements attendus est fonction de la situation qui existe en termes de la structure synthétisée jusque là et les capacités discriminatoires des comportements existants.

Source : Laaroussi, A (2007).

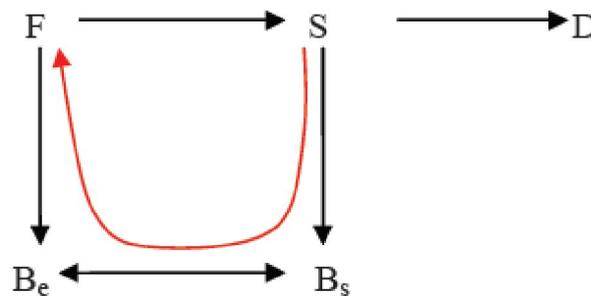


Fig.1.23 Reformulation 3 : Redéfinir les fonctions ou les buts de l'objet est dépendant de la situation.

Source : Laaroussi, A (2007).

I.4 Conclusion:

Dans ce chapitre, on a mis en évidence le processus de la conception architecturale à travers deux axes. Le premier axe dressait une approche exploratoire de la conception à travers une caractérisation des problèmes de conception, les solutions de conception, la conception elle-même, l'idée de conception et le rôle du dessin dans la conception alors que dans le deuxième axe un état de l'art des méthodes de conception a été réalisé. Comprendre et tenir compte les modes de raisonnement, les différents éléments qui composent le processus de conception en architecture est essentiel afin de proposer des outils et méthodes efficaces.

¹²² Laaroussi, A, Assister la Conduite de la Conception en Architecture: Vers un système d'information orienté, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.

A l'issue de ce chapitre, on a vu que la conception est un mélange de raisonnement technique et rationnel et une sorte d'intuition. Cette dernière est incarnée dans la connaissance et l'expérience de l'architecte. Elle est également un processus de décision dialectique dans le sens où il y a une conversation entre l'architecte et lui-même à travers le dessin. Ce processus est également cyclique ou itératif, où les solutions et les critères sont explorés et raffinés de façon continue.

Nous avons vu également que la conception en architecture se situait dans la catégorie des problèmes mal-définis, en ce sens qu'elle ne comportait pas une solution unique pouvant être obtenue grâce à une méthode garantissant l'atteinte de cette solution. Les solutions de la conception ne sont pas exhaustives et holistiques. Autrement dit, il n'y a pas une solution optimale à un problème de conception mais plutôt une solution acceptable et satisfaisante qui répond le mieux aux exigences et contraintes du projet architectural.

Il est à noter également que la conception architecturale implique des problèmes de décision complexes ce qui implique des critères multiples et conflictuels qui ont besoin d'être combinés pour l'obtention d'une solution idéale. Augmenter la dimension des fenêtres par exemple, signifie non seulement utiliser plus de lumière naturelle dans l'environnement intérieur, mais aussi augmenter la charge thermique à l'intérieur du bâtiment. Les méthodes de conception proposées par les différents chercheurs ont un caractère simpliste et ne prennent pas tous les critères du projet architectural. En plus, elles présentent une complexité dans leur application et ne fournissent pas un appui méthodologique pour l'architecte devant sa table de dessin.

Pour ce faire, une approche multicritère est exigée pour évaluer la « qualité » globale d'une solution architecturale proposée. En plus, plus nous avançons dans le processus de conception, plus la quantité d'informations à notre disposition est grande et au fur et à mesure que nous cheminons dans ce processus nous nous éloignons des décisions importantes. Pour cette raison, il nous semble primordial de viser la phase de l'esquisse pour l'élaboration de futurs outils d'aide à la décision et la conception afin que les choix des concepteurs gagnent en efficacité. Cela permettrait de rester sur des solutions plus faciles à optimiser aux phases ultérieures du processus de projet. Au fur et à mesure que le projet architectural se conçoit, il devient de plus en plus difficile et onéreux de le modifier. Comme présenté précédemment, il est logique de proposer des aides dès la phase d'esquisse, le principal intérêt étant d'éviter des erreurs de conception pouvant compromettre la qualité future du bâtiment.

Chapitre deux

Conception bioclimatique

II.1 Introduction :

L'architecture depuis l'antiquité impliquait l'exploitation des ressources naturelles pour servir les besoins humains. Il y a une longue tradition de construction en harmonie avec l'environnement immédiat et le climat. Socrate, environ 400 avant JC a eu quelques idées sur la convenance climatique des maisons et la façon par laquelle elles avaient été construites pour assurer le confort thermique. Vitruvius, 1 siècle avant JC, a également écrit au sujet de la nécessité de considérer le climat comme élément de conception de bâtiment, pour des raisons de santé et de confort¹. Mais malheureusement l'harmonie entre l'architecture et son environnement physique avait été brisée au 20ème siècle par les architectes qui ont eu tendance à abandonner les variables climatiques au bénéfice de la haute technologie dans le processus de la conception architecturale. C'est la crise énergétique des années 70 qui a changé les attitudes et a donné naissance à ce qu'on l'appelle actuellement « l'architecture bioclimatique ».

Dans ce chapitre nous aborderons la notion du climat à travers sa définition, ses variables, ses échelles et ses types qui doivent être prises en compte lors des processus de conception architecturale dans un premier axe et les différents éléments qui se rapportent directement à la conception bioclimatique dans deuxième axe.

II.2 définition :

Olgay a utilisé le terme « bioclimatique » pour la première fois en 1953 pour définir l'architecture qui répond à son environnement climatique en vue de réaliser le confort pour les occupants grâce à des décisions de conception appropriées² ; voir fig.2.1. La conception bioclimatique est surtout une sorte d'engagement dont les bases sont : un programme architectural, un paysage, une culture, quelques matériaux locaux, certaine notion de bien-être et d'abri dont la synthèse est une couverture habitable³.

¹ Szokolay, S et Auliciems, A, Thermal comfort, The University of Queensland, 2007

² Evans. J. M, The comfort triangles: a new tool for bioclimatic design, thèse de doctorat, Delft University, 2007.

³ De Asiain. A, et al., "Reflections on the Meaning of Environmental Architecture in Teaching", the 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands, 19 – 22 September 2004, P.1-6.

Pour Pierre Lavigne et Pierre Fernandez l'architecture bioclimatique vise principalement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière naturelle, c'est à dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables, les effets pervers sur le milieu naturel et les coûts d'investissement et de fonctionnement. L'intérêt du Bioclimatique va donc du plaisir d'habiter ou d'utiliser un espace à l'économie de la construction, ce qui fait un élément fondamental de l'art de l'architecte⁴.

Le concept de l'architecture bioclimatique est à l'origine de l'émergence des nouveaux concepts comme : « Haute Qualité Environnementale, HQE » ou mieux encore « Très Haute Performance Energétique », « Architecture Ecologique », « Architecture Durable » et « Architecture Verte ». Le concept de l'architecture bioclimatique mérite une explication plus profonde. L'hypothèse est que cette affiliation mène aux réactions favorables en termes de performance, de santé humaine et même les situations émotionnelles⁵.

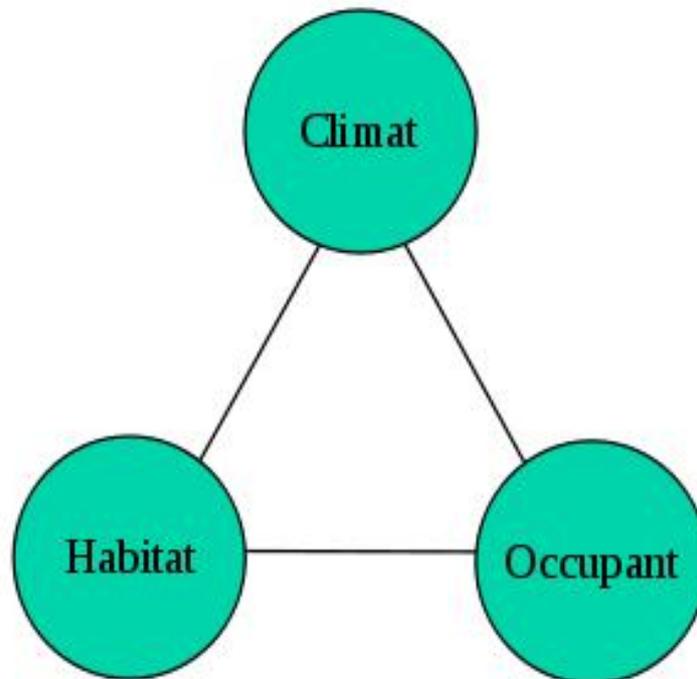


Fig.2.1 les trois éléments de l'architecture bioclimatique
Source : Wikipédia, 2012

⁴ Lavigne. P. Et Fernandez. P, Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes, Le moniteur, Paris, 2009.

⁵ Almusaed. A, Biophilic and Bioclimatic Architecture, Springer-Verlag, London, 2011.

II.3 climat et paramètres climatiques :

II.3.1 Définition :

Le mot « climat » prend ses racines du mot grec « Klima » qui signifie « pente », « inclinaison » en référence à l'angle des rayons du soleil. Cette « inclinaison » (en fait appelée « déclinaison ») varie au cours de la journée qu'au long de l'année et conditionne l'ensemble des paramètres climatiques⁶.

Les définitions du climat sont nombreuses :

Le climat est défini comme étant « *l'intégration dans le temps les conditions météorologiques, caractérisant un emplacement géographique donné* »⁷.

Le climat, dans un sens étroit, est considéré comme le « temps moyen », ou de façon plus scientifiquement exacte, « *la description statistique en termes de moyennes et de variabilité de grandeurs pertinentes sur une période de temps* »⁸.

Le climat a deux notions différentes, celle du climat moyen et celle de la variabilité climatique. Le climat moyen correspond à l'ensemble des conditions qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu ou une région donnée. La variabilité du climat correspond à la dispersion statique de ses éléments caractéristiques autour de leur valeur moyenne⁹.

Dans un sens plus large, le climat est l'état du système climatique qui comporte l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la lithosphère et la biosphère de la surface. Ces éléments, tous de déterminer l'état et la dynamique du climat de la Terre¹⁰.

Il y a trois propriétés des données climatiques à considérer¹¹ : les normales, les extrêmes, et les fréquences sont utilisés pour évaluer l'état de l'atmosphère sur une période de temps particulier par rapport à des conditions atmosphériques sur une période de temps similaire dans le passé.

- Les normales : elles se reportent aux conditions climatiques moyennes normales d'un endroit et donnent une image sur le type des conditions météorologiques prévues dans un endroit pendant une année.

⁶ Roberto Gonzalo Karl J. Habermann, Architecture et efficacité énergétique, principes de conception et de construction, Birkhauser Verlag AG, Berlin, Allemagne, 2008

⁷ Szokolay. S, Introduction to architectural science, the basis of sustainable design, Published by Elsevier, 2008, P.22

⁸ <http://www.wmo.int>

⁹ Guyot. G, Climatologie de l'environnement Cours et exercices corrigés, Edition DUNOD, Paris, 1999.

¹⁰ <http://www.wmo.int>

¹¹ Robert. Rohli. et Anthony J. Vega, 2012.

- Les extrêmes sont utilisés pour décrire les valeurs maximales et minimales des variables atmosphériques enregistrées après une longue période d'observation.
- Les fréquences ont trait au rôle de l'incidence d'un phénomène particulier dans un endroit particulier pendant une longue période de temps.

II.3.2 Echelle du climat :

Il est important de souligner que la climatologie implique l'étude des phénomènes atmosphériques par des échelles spatiales différentes. Il y a généralement une relation directe entre la taille des phénomènes atmosphériques et l'échelle du temps dans lequel ce phénomène se produit. Robert, V.Rohli. et Anthony J.Vega ont proposé cinq échelles climatiques¹² :

- Microclimat: représente la plus petite de toutes les échelles atmosphériques. Les phénomènes qui se produisent dans cet échelle spatiale sont inférieurs à 0,5 km et durent généralement de quelques secondes à quelques heures.
- L'échelle locale: zones comprises entre environ 0,5 et 5 km.
- Mésos-échelle: les phénomènes de produisent dans des zones comprises entre environ 5 et 100 km et durent généralement de quelques heures à quelques jours.
- Échelle synoptique: les zones comprises entre 100 et 10.000 km. Quelques jours à des semaines.
- L'échelle planétaire: étude du climat sur tout l'hémisphère ou le globe terrestre. Zones comprises entre 10.000 à 40.000 km.

Une autre classification des échelles des climats est trouvée dans Hupfer (1991) ; voir fig.2.2 et fig. 2.3. Hupfer a proposé trois échelles qui sont le macroclimat, le méso-climat et le microclimat¹³. Pour des raisons de la conception bioclimatique, on a besoin d'une méthodologie qui traite ces différentes échelles en relation avec le bâtiment.

- Le macroclimat : Szokolay (1991) a défini trois types de macroclimat pour les bâtiments¹⁴ :
 - Les températures chaudes qui sont la plupart du temps au-dessus de la zone de confort ;
 - Les températures modérées qui tombent dans la zone du confort ;

¹² Ibid

¹³ Thomas, F, Micrometeorology, Carmen J. Nappo, Germany,2008

¹⁴ Hyde. R(ed), Bioclimatic Housing, Innovative designs for warm climates, USA, 2008.

- o Les températures froides qui sont la plupart du temps au-dessous de la zone du confort.

km	Orlanski (1975)	Böer (1959)	Kraus (1983)	Hupfer (1989)
10 ⁴	makro-β	large climate	macro range	global climate
10 ³	meso-α	range	synopt. range	zonal climate
10 ²	meso-β		meso-	landscape climate
10 ¹	meso-γ	local climate	range	
10 ⁰	mikro-α	range	micro range	plot climate
10 ⁻¹	mikro-β		topo range	small scale climate
10 ⁻²	mikro-γ			
10 ⁻³		micro climate range		border layer climate
10 ⁻⁴				

Fig.2.2 les différentes classifications des échelles climatiques Hupfer (1991)
Source : Thomas. F (2008)

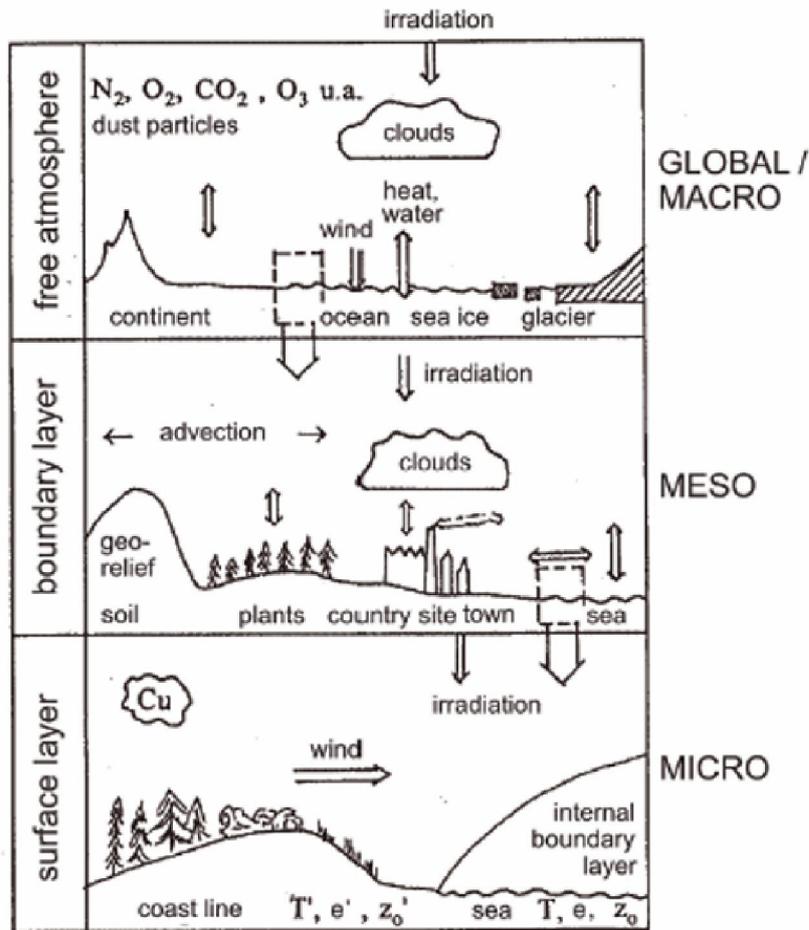


Fig.2.3 le système climatique dans l'échelle macro, méso et micro Hupfer (1991)
Source : Thomas. F (2008)

- Le méso-climat : Les conditions du méso-climat augmentent ou réduisent les conditions du macroclimat. Les effets de la topographie, de la végétation et d'autres caractéristiques physiques créent l'effet du méso-climat. Six types principaux du méso-climat peuvent être distingués selon Goulding et autres (1992) : ¹⁵
 - Côtière : l'influence des brises locale de la mer sur l'augmentation des températures en hiver et le baissement en été par rapport aux zones continentales.
 - Terres plates et ouvertes : l'influence des vents puissants sur les zones où il y a peu d'obstacles physiques comme le désert et les plaines.
 - Régions boisées et les forêts : les températures sont plus stables, une humidité plus élevée que dans les zones ouvertes ainsi que un ombrage élevé.
 - Vallées : influence sur le rayonnement solaire et le régime des vents « l'effet de cheminée ».
 - Montagnes : la température baisse pour chaque 100m d'altitude.
 - Villes : « ilot de chaleur urbaine », l'écoulement d'air au niveau du sol baisse.
- Microclimat : La compréhension du microclimat est également une priorité majeure. Le microclimat d'un site est affecté par les facteurs suivants ¹⁶ :
 - la forme du terrain.
 - la végétation.
 - les points d'eau.
 - la largeur des rues et l'orientation.
 - les espaces ouverts et la forme construite.

L'étude du microclimat aide l'architecte à évaluer la quantité du rayonnement solaire reçu par le site pour en tirer profit pour le chauffage passif ou en éviter par l'ombrage ou les protections solaires. Elle permet également d'évaluer le régime des vents pour l'orientation des bâtiments et la ventilation naturelle...etc.

II.3.3 paramètres climatiques :

Il est vraiment difficile de définir les effets de chacun des différents éléments du climat séparément. Pour une approche typiquement architecturale on a besoin d'une méthodologie qui fait une évaluation de chacun des éléments du climat et son effet sur le bâtiment.

¹⁵ ibid

¹⁶ Markus T. A. and Morris E. N., Buildings, climate and energy, Pitman Publishing Limited, London, 1980.

Olgyay (1962)¹⁷ a défini trois éléments climatiques qui ont des effets sur la construction, la température de l'air, le rayonnement solaire et le vent. Givoni (1978)¹⁸ a ajouté deux autres éléments ; l'humidité et la précipitation.

II.3.3.1 Température de l'air :

Elle est mesurée à l'ombre, généralement dans une boîte ventilée à 1.2 à 1.8 m au-dessus du niveau du sol¹⁹. Elle est essentiellement influencée par l'ensoleillement (rayonnement du soleil qui chauffe la terre le jour et du rayonnement nocturne qui la refroidit la nuit), mais également par le vent, l'altitude et la nature du sol²⁰.

Olgyay (1962)²¹ et Givoni (1978)²² voient que la température de l'air dépend essentiellement de la clarté ou l'opacité du ciel qui change par la saison. Par conséquent, les jours clairs de l'été sont très chauds, alors que les jours clairs de l'hiver sont très froids et cela est justifié par le transfert de l'énergie solaire.

La température de l'air est un élément crucial qui doit être pris en considération dans la conception architecturale tant que les déperditions thermiques d'un bâtiment sont en grande partie liées aux températures extérieures. Les déperditions thermiques par transmission dépendent de trois facteurs : les surfaces émissives de chaleur, leurs propriétés isolantes et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Le troisième facteur se rapporte au climat, alors que les deux premiers font partie du choix de l'architecte et la conception en générale²³.

Cette température varie au cours de la journée, de l'année et d'une année à autre. Pour des raisons de la conception architecturale on fait des mesures pendant plusieurs années pour définir cinq températures par mois²⁴ : la température moyenne, la température maximale moyenne, la température minimale moyenne, la température maximale maxima et la température minimale minima. Voir fig.2.4.

¹⁷ Olgyay. V, Design With Climate, Prinston university press, Prinston, New Jersey 1962.

¹⁸ Givoni. B, L'homme, L'architecture et le climat, édition le Moniteur, paris, 1978.

¹⁹ Szokolay. S, Introduction to architectural science, the basis of sustainable design, Published by Elsevier, 2008

²⁰ Alain. L et André D. H, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Observ'ER, Paris, 2005

²¹ Olgyay. V, Design With Climate, Prinston university press, Prinston, New Jersey 1962.

²² Givoni. B, L'homme, L'architecture et le climat, édition le Moniteur, paris, 1978.

²³ Roberto. G et Karl J. H, Architecture et efficacité énergétique, principes de conception et de construction, Birkhauser Verlag AG, Berlin, Allemagne, 2008.

²⁴ Pierre. F. Et Pierre. L, Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes, Le moniteur, Paris, 2009.

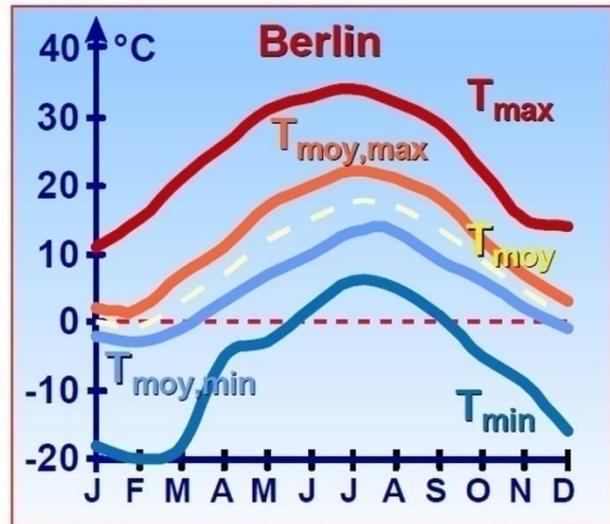


Fig.2.4 Température mensuelles à Berlin
Source : Alain, L et André D. H, (2005)

II.3.3.2 Le vent :

Le vent est un facteur climatique produit par les déplacements d'air à la surface de la terre, des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Ce déplacement est causé également par la topographie locale et la rugosité des surfaces²⁵. Le vent est mesuré à 10 m au-dessus du sol en plein pays, mais plus élevé dans les zones bâties pour éviter les obstacles²⁶. Le vent est décrit par sa vitesse et sa direction. Il est mesuré par un anémomètre. Des diagrammes de fréquence, roses de vent, (fig.2.5), sont souvent tracés pendant chaque mois de l'année ou pendant les saisons principales pour aider les architectes à connaître les effets internes du vent sur le bâtiment. Il y a aussi un autre outil appelé échelle de Beaufort (1806). Cette échelle est basée essentiellement sur l'observation et explique les caractéristiques du vent suivant sa vitesse. Cet outil aide les concepteurs à connaître son effet sur l'environnement²⁷.

Sur une échelle globale les vents du monde agissent en tant que mécanisme primaire d'équilibre thermique qui aide à compenser le déséquilibre latitudinal persistant de l'énergie de la terre. Ce déséquilibre est provoqué par la région équatoriale qui absorbe

²⁵ Samuel. C. et Jean-Pierre. O, La conception bioclimatique, Terre vivante, Mens, France, 2007.

²⁶ Szokolay. S, Introduction to architectural science, the basis of sustainable design, Published by Elsevier, 2008

*fréquence : la proportion de temps pendant laquelle il a lieu.

²⁷ Pierre. F. Et Pierre. L, Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes, Le moniteur, Paris, 2009.

plus de rayonnement solaire reçu et les régions polaires qui perdent plus de rayonnement qu'elles reçoivent du soleil²⁸.

Il est donc nécessaire pour les concepteurs de décider s'il faut se protéger des vents pendant les périodes hivernales ou il faut en profiter pendant les périodes estivales tant que le vent a des influences directes sur le bâtiment. Dans les périodes hivernales le vent agit sur le bâtiment soit par l'augmentation des déperditions soit par transmission soit par ventilation, alors que dans les périodes estivales il est bienvenu surtout dans les climats tropicaux parce qu'il rafraîchit l'atmosphère.

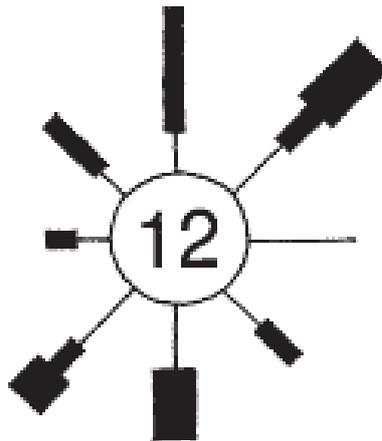


Fig.2.5 Un diagramme de fréquence de vent, « rose du vent »²⁹
Source : Hans. R (2000).

II.3.3.3 Humidité de l'air :

L'humidité de l'air peut être exprimée comme la pression de vapeur d'eau, l'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments influence le corps humain de façon directe et indirecte, pouvant provoquer l'inconfort, et la sensation de chaleur et de sécheresse des muqueuses des voies respiratoires.

L'humidité n'a pas des influences sur le confort quand les températures sont basses mais dans les climats chaud et humide elle est une source d'inconfort parce que les échanges thermiques par évaporation ont lieu surtout sur la surface de la peau.

Elle provoque aussi la condensation qui pose des problèmes sanitaires et endommage les matériaux structuraux ou de décoration. McMullan (1998) a proposé une combinaison appropriée de ventilation, de chauffage, et de techniques d'isolation afin d'empêcher la condensation dans les bâtiments. L'usage du bâtiment et son environnement immédiat ont

²⁸ John. E. O, *Encyclopedia of World Climatology*, Springer, the Netherlands, 2005.

²⁹ La longueur des lignes décrit des fréquences de différentes directions, et l'épaisseur décrit des intervalles de vitesse du vent, selon l'échelle et la légende. La figure au milieu est le pourcentage du calme.

également une grande influence sur l'humidité à travers le refroidissement évaporatif de la végétation et les points d'eau³⁰.

II.3.3.4 Précipitations :

C'est le volume total de pluie, grêle, neige ou rosée, mesuré par des pluviomètres et exprimé en millimètre par unité de temps (jour, mois ou année)³¹. Les nuages jouent un rôle crucial dans le taux des précipitations de la planète. Leur distribution est variable mais elles se produisent généralement dans les régions qui se caractérisent par les branches croissantes des cellules de Hadley et de Ferrel dans les zones tropicales et les latitudes moyennes³². Voir fig.2.6

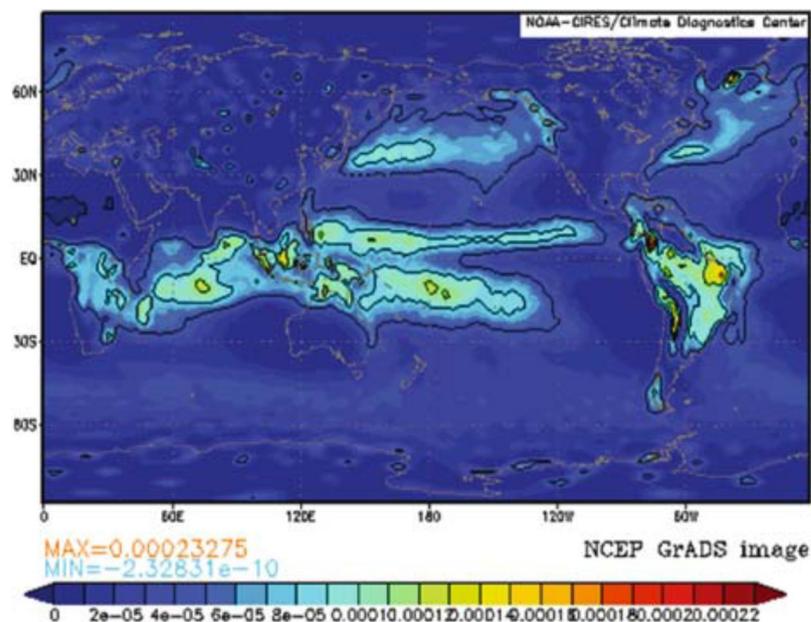


Fig.2.6 La moyenne DJF du taux de précipitation
Source: Haigh J. D. et al. (2004).

II.3.3.5 Rayonnement solaire :

« Le soleil fournit 99,998% de l'énergie qui anime l'atmosphère, le reste 0,002% provient de l'intérieur de la Terre³³ » ; voir fig.2.7. L'équilibre de la température moyenne globale de la terre est déterminé par un équilibre entre l'énergie acquise par l'absorption du rayonnement solaire entrant et l'énergie perdue dans l'espace par l'émission du

³⁰ Çacri. Ç, Assessing thermal comfort conditions, Master thesis, Middle East University, December, 2006.

³¹ Szokolay. S, Introduction to architectural science, the basis of sustainable design, Published by Elsevier, 2008

³² J, D, Haigh et al. The sun, solar analogs and the climate, Swiss society of astrophysics and astronomy, 2004

³³ Claudio V. F, The sun, Natural History Museum, London, UK, 2008.P.61

rayonnement infrarouge. La quantité d'énergie solaire absorbée dépend du rayonnement entrant et les propriétés réfléchissantes de la terre³⁴.

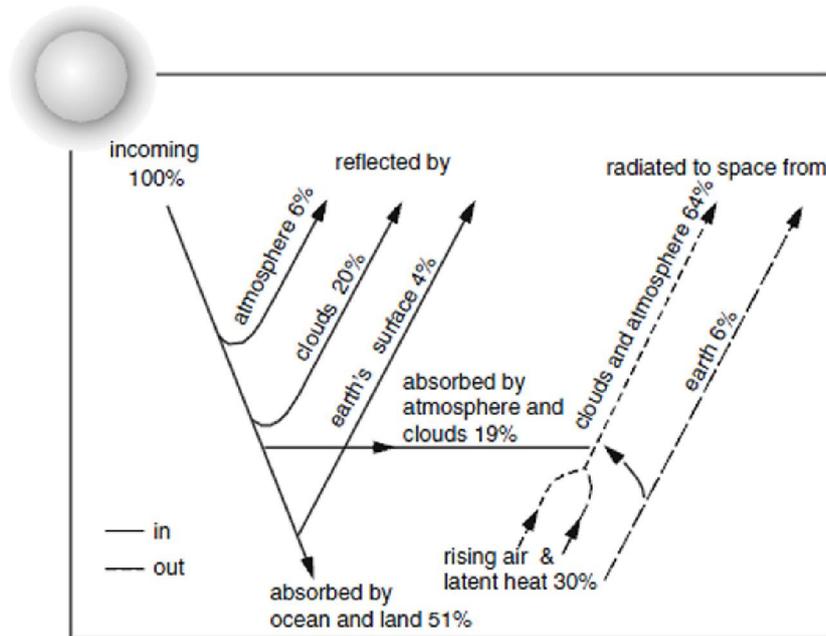


Fig.2.7 Le budget du rayonnement solaire de la terre
Source: Claudio V. F (2008)

On distingue trois types de rayonnement qui constituent le rayonnement global ; voir fig.2.8. Le rayonnement diffus dans toutes les directions par les molécules d'air, le rayonnement directe qui frappe le sol directement et le rayonnement réfléchi par les points d'eau et les bâtiments voisins³⁵.

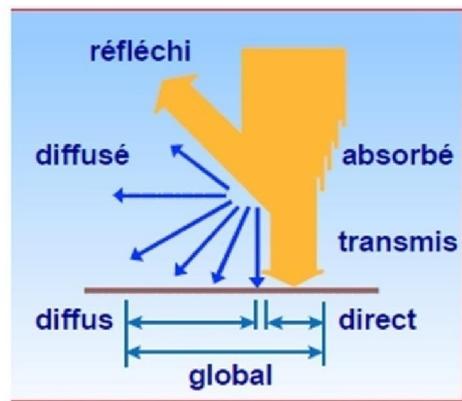


Fig.2.8 Les trois composantes du rayonnement global
Source : Alain Liebard et André De Herde (2005)

³⁴ Haigh J. D. et al., The sun, solar analogs and the climate, Swiss society of astrophysics and astronomy, 2004

³⁵ Alain. L et André D. H, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Observ'ER, Paris, 2005.

Le rayonnement solaire est un élément important à prendre en considération dans la conception bioclimatique. L'architecte doit en tirer profit dans les climats froids ou dans les périodes hivernales et en éviter dans les climats chauds ou dans les périodes estivales. Le rayonnement solaire est un facteur déterministe pour les façades surtout dans les climats froids.

II.3.4 Classification et types des climats :

L'idée de pouvoir identifier les différents types des climats a souvent été une préoccupation majeure des géographes et des climatologues et rarement des architectes. Ce problème est en réalité très complexe. Chaque auteur y propose une classification originale. Certains chercheurs ont basé sur la végétation, d'autres sur la précipitation, la température et l'évapotranspiration. Certaines classification servent les buts de l'agriculture, la biologie, l'énergie et d'autres sont utilisées dans des études sur la santé humaine et malheureusement peu d'entre elles servent les études de l'architecture.

II.3.4.1 La classification basée sur la végétation :

La végétation est rarement utilisée seul pour classifier les zones climatiques pour la conception, mais la plupart des classifications climatiques se rapportent à elle³⁶, tant que la végétation vivante reflète toutes les nuances des conditions climatiques au long de toute l'année.

Le système le plus généralement utilisé est celui de Wladimir Köppen qui a présenté son système la première fois en 1868³⁷. Le travail de Köppen peut être regardé comme un déterminisme climatique des types de la végétation. Le système de Köppen n'était pas clair au début jusqu'à 1918. La classification de Köppen distingue 25 types de climats. Elle est basée sur un zonage en utilisant la distribution de cinq différents types de végétation : les forêts tropicales humides, la flore du désert chaud, les forêts de feuillus tempérés, les forêts boréales et la toundra³⁸. (fig.2.9)

³⁶ Olu Ola, O et Bogda P. O, "Defining Climatic Zones for Architectural Design in Nigeria: A Systematic Delineation", *Journal of Environmental Technology*, 1(2), 2002, P. 1 – 14.

³⁷ John. E. O, *Encyclopedia of World Climatology*, Springer, The Netherlands, 2005. p219

³⁸ <http://www.wmo.int>

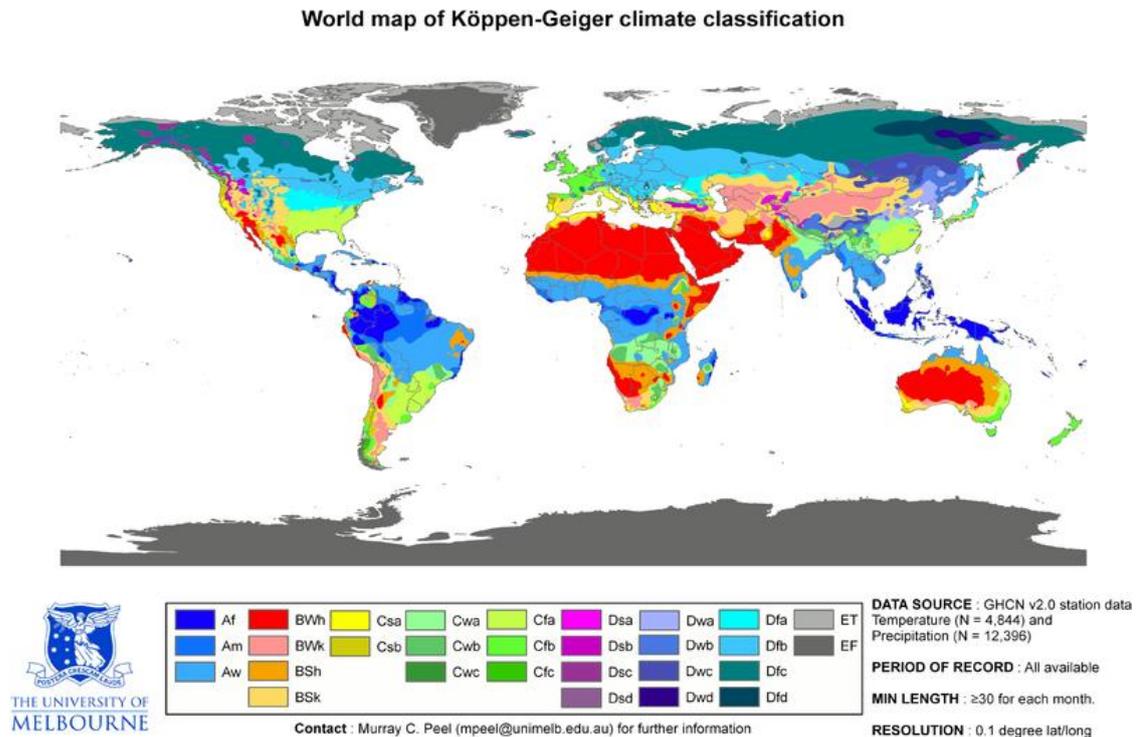


Fig.2.9. La classification de Köppen. Peel M. C. et al (2007)
Source: <http://www.wmo.int>

II.3.4.2 La classification géo-climatique:

Les biogéographes définissent les régions climatiques par le biais de la végétation. Les géographes ont cherché des milieux typiques. L'une des classifications les plus récentes est celle de Rosali Mignon comme géographe général. Elle distingue huit climats fondamentaux³⁹ : (fig.2.10)

1. Climat polaire.
2. Climat continental.
3. Climat continental sec.
4. Climat océanique.
5. Climat méditerranéen.
6. Climat aride chaud.
7. Climat tropical.
8. Climat équatorial.

³⁹ Zeroual. D, Impacts des gains de chaleurs sur la morphologie des bâtiments, Thèse de magistère, Université de Constantine, 2006.

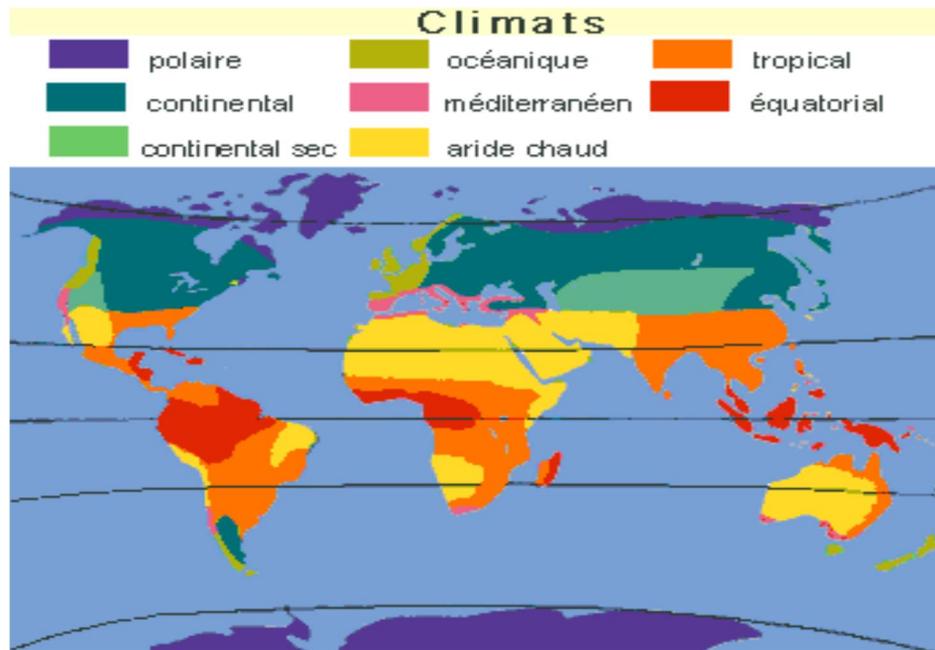


Fig.2.10: Carte des climats de monde (Rosali Mignon ; 1998)
Source : Zeroual. D (2006)

Olu Ola Ogunsote et Bogda Prucnal-Ogunsoteont (2002) ont critiqué ces deux type de classification en arguant que ces types sont étroitement liés à la végétation ou aux éléments du climat tels que la température et ne sont pas directement liés aux besoins du confort humain. Les zones climatiques pour la conception architecturale ne peuvent pas être établies uniquement sur la base de la végétation. L'une des principales lacunes du système de Köppen est son fondement sur la végétation de couverture qui n'a pas trait au confort thermique (Evans, 1980). Autrement dit, les classifications ne sont pas directement applicables aux bâtiments. Cela est lié à l'absence d'humidité ; un facteur de confort thermique important dans la classification⁴⁰.

II.3.4.3 Classification pour la conception architecturale :

Pour des raisons de conception architecturale, Akinston (1953) a proposé un système simple basé sur la nature du problème thermique humain dans un emplacement particulier indiquant juste quatre types de climat⁴¹ : voir fig.2.11

- Froid : il s'agit des climats où le problème principal est le manque de la chaleur, ou une dissipation thermique excessive pour toute ou la majeure partie de l'année.

⁴⁰ Olu Ola, O et Bogda P. O, "Defining Climatic Zones for Architectural Design in Nigeria: A Systematic Delineation", *Journal of Environmental Technology*, 1(2), 2002, P. 1 – 14.

⁴¹ Szokolay. S, *Introduction to architectural science, the basis of sustainable design*, Published by Elsevier, 2008

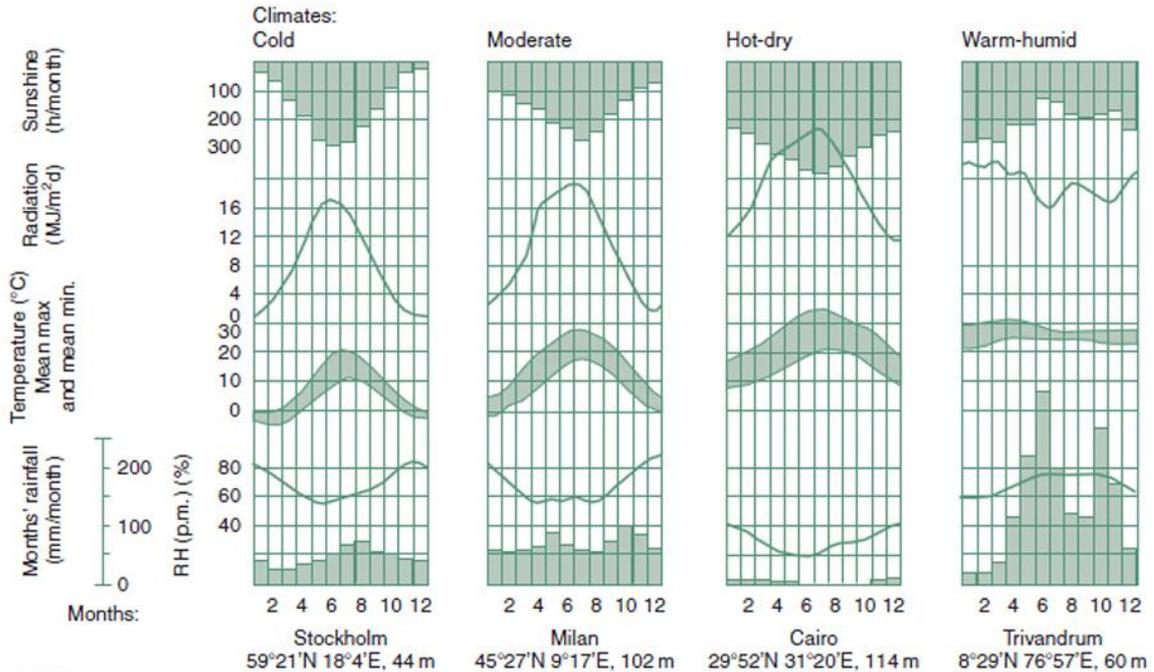


Fig.2.11 les quatre climats proposés par Akinston (1953).

Source: Szokolay, (2008).

- Tempéré : il s'agit des climats où il y a une variation saisonnière entre l'hypothermie et la surchauffe, mais ni l'un ni l'autre est grave.
- Chaud et sec : ils sont les climats dont l'air est sec et le problème principal est la surchauffe ainsi que le mécanisme du refroidissement évaporatif du corps n'est pas restreint. Ils se caractérisent par un écart thermique important entre le jour et la nuit.
- Tiède et humide : ces climats se caractérisent par des taux d'humidité très élevés qui agissent négativement sur le potentiel évaporatif. La surchauffe n'est pas assez grande comme le cas des climats chauds et secs. Ces climats se caractérisent également par un écart thermique très petit entre le jour et la nuit.

Atkinson a également utilisé un système pour la classification des climats chauds par rapport aux besoins de la construction. Il est la base des propositions des Nations Unies concernant les maisons et les types des plans pour les divers climats (1971) ; voir tableau 2.1. Evans (1980) a critiqué ce classement du fait qu'il a abordé certains types de climat et il n'est pas applicable aux climats froids⁴².

⁴² Olu Ola, O et Bogda P. O, "Defining Climatic Zones for Architectural Design in Nigeria: A Systematic Delineation", *Journal of Environmental Technology*, 1(2), 2002, P. 1 – 14.

		Tiède et humide	île tiède et humide	Désert chaud et sec		Désert maritime chaud et sec		composite			Haut terre tropicale
				chaud	cool			HD	WH	CD	
Température de l'air	Min	21-27	18-24	24-30	10-18	23-30	10-18	21-27	24-27	4-10	10-13
	Max	27-32	29-32	43-49	27-32	<36	21-26	32-43	27-32	<27	24-30
Humidité (%)		55-100	55-100	10-55		50-90		20-25(sec) 55-95(mouillé)			45-99
Précipitation (mm)		2000-5000	1250-1800	50-150		Très bas		500-1300			>1000
Les conditions du ciel		assez nuageux	clair	clair		clair		clair-obscurci			clair
Radiation solaire		Éblouissement douloureux	Fort, direct	Fort, direct		fort		Fort, direct			Fort, direct
Les vents		Vélocité réduite, calme	Vents commerciaux 6-7m/s	Local, chaud, poussiéreux		Vents locaux, côtiers		chaud, poussiéreux			oriental
végétation		très luxuriant	luxuriant	clairsemé		clairsemé		clairsemé			vert
Conditions spécifiques		Moustiques Rusting Rotting Orage	cyclones et ouragans	la poussière et tempêtes de sable		la poussière et tempêtes de sable		la poussière et tempêtes de sable			brouillard lourd de rosée, orages de grêle

Tableau 2.1 Le système d'Akinston, réadapté par auteur
Source: Olu Ola, O et Bogda P. O (2002)

D'autres recherches sur le climat⁴³ ont mené à une classification de trois climats principaux (Climat chaud et humide, chaud et sec et climat de mousson ou transitionnel) avec des sous climats (climat des hauteurs « upland climate », climat désertique maritime, climat d'île tropicale) et des sous climats supplémentaires (climat méditerranéen subtropicale, climat tempéré, climat froid, climat maritime et froid, climat continental, climat de montagne à mi-latitude.) Voir tableau 2.2.

II.3.4.4 Classification du climat en Algérie : L'Algérie a cinq zones fondamentales⁴⁴.

Voir fig.2.12 : Zone E1 : Littoral ; Zone E3 : Présaharien et Tassili, Zone E2 : Hauts plateaux Zone E4 : Sahara Zone E5 : Tanezrouft

⁴³ Evans. J. M, The comfort triangles: a new tool for bioclimatic design, Thèse de doctorat, Delft University, 2007.

⁴⁴ Mokhtari. A et al, « Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°2, 2008, 307 – 315.

Variable climatiques		Tiède humide	Chaud sec	confort	froid	Très froid
Température typique c°		20-30	15-35	15-25	5-15	<5
Humidité relative%		>80%	<60%	60-80	-	-
Degré d'oscillation de la température C		<10° C	>12° C	8-12	<10° C	-
Classification du climat	latitude					
Tiède et humide		x				
Chaud sec			x	x		
transition		x	x	x		
mousson		x	x	(x)	x	
Haut terre tropicale				x	(x)	
Désert maritime		x	x			
subtropicale		(x)	x	x	x	
tempéré				x	x	
Alpine-Andean				x	x	x
Modéré et cool				x	x	
froid				(x)	x	x
Très froid					x	x

Note: (X) indique des saisons courtes avec les conditions définies ou les variations possibles de climat. Tableau 2.2 Classification du climat. Réadapté par auteur
 Source : Evans (2007)

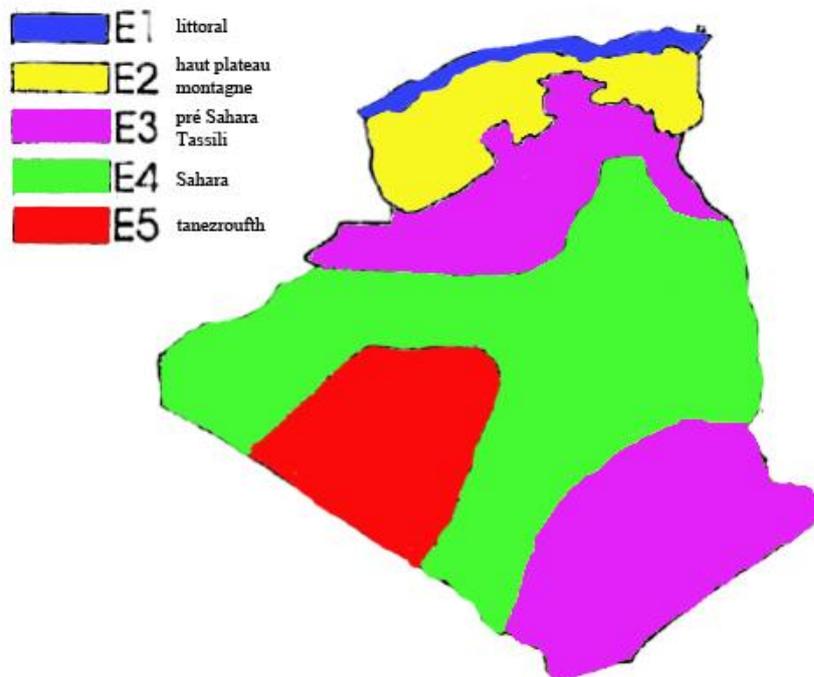


Fig.2.12 Les zones climatiques d'Algérie (*Recommandations Architecturales*, ENAG Edition, Alger.). Source : Mokhtari et al (2008)

II.4 les paramètres qui se rapportent à la conception architecturale :

II.4.1 La localisation du bâtiment :

« *Le site est plus qu'une adresse. C'est la somme totale des attributs économiques, environnementaux, et sociaux de sa localisation*⁴⁵ ». L'intégration du bâtiment dans son environnement est le premier principe de l'architecture bioclimatique. Il est très nécessaire d'avoir une parfaite connaissance des vents dominants, de la radiation solaire incidente et des masques solaires voisins, les risques d'inondations, de la végétation environnante...etc. La construction sur une pente ou une colline affecte la quantité de rayonnement solaire reçue par les bâtiments. La présence de la végétation dans le site est avantageuse. Les arbres peuvent être utilisés comme une ceinture qui protège le site des vents froids, comme ils peuvent contribuer au refroidissement évaporatif, l'ombrage, le filtrage des particules et de poussière, l'atténuation de bruit et l'absorption de CO₂ carbonique, ainsi que leur rôle dans la santé psychique des êtres humains.

II.4.2 La forme et l'orientation du bâtiment :

« *La forme est la connaissance exprimée. La forme d'un objet évolue de la connaissance et de la technologie que le concepteur possède quand le processus de conception commence. Quand le concepteur a des nouvelles connaissances, le processus de conception change et les changements de la forme est le résultat.*⁴⁶ » La forme du bâtiment est un élément très influent sur les interactions potentielles entre l'environnement immédiat et le bâtiment. Elle est manipulée pour chercher la performance énergétique en exploitant les paramètres climatiques favorables pour le confort humain⁴⁷. Oral et Yilmaz (2002) ont confirmé que « *la forme a une influence significative sur la perte de chaleur totale dans le bâtiment* »⁴⁸. Une configuration optimale compacte permet d'économiser entre 10 et 20% des besoins énergétiques parce qu'elle a la moindre surface exposée au climat extérieure⁴⁹. Voir fig.2.13.

⁴⁵ Daniel E. W, *Sustainable Design, Ecology architecture, and planning*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007. P103

⁴⁶ Ibid, P108

⁴⁷ Mat Santamouris (Ed) ,*Environmental design of urban buildings : An Integrated Approach*, Earthscan, London, UK, 2006

⁴⁸ Çacri. Ç, *Assessing thermal comfort conditions*, Master thesis, Middle East University, December, 2006, P22.

⁴⁹ Michael. B et al, *Green Building – Guidebook for Sustainable Architecture*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.



Fig.2.13 Analyse énergétique des formes de base de la construction
Source: Michael. B et al (2010)

Les frères Olgyay ont stipulé que les organismes vivants ont une capacité d'adaptabilité et que cette dernière donne naissance aux formes résultantes. Ils ont fait des optimisations sur les dimensions horizontales des bâtiments dans différents climats en considérant les performances thermiques des bâtiments (fig.2.14). Ils sont arrivés à ⁵⁰ :

- La forme carrée n'est pas la forme optimale dans aucun endroit.
- La forme allongée sur l'axe Nord-Sud présente moins d'efficacité que la forme carrée soit en hiver soit en été.
- La forme optimale dans tous les climats est celle allongée le long de l'axe Est-Ouest.
- Dans la plupart des bâtiments commerciaux quel que soit le climat, l'orientation Nord-Sud présente des coûts d'exploitation élevés dus aux charges de refroidissement. Cependant, l'utilisation des enveloppes orientées Est-Ouest qui ont la forme en dents de scie peut réduire les pénalités.
- Dans toutes les latitudes, bien que les bâtiments allongés le long de l'axe Est-Ouest soient les plus efficaces, l'élongation optimale dépend du climat. Quelques principes généraux peuvent être énoncés pour les différents climats :
 - Climat frais et chaud-sec : une forme compacte du bâtiment est souhaitable.
 - Climat tempéré : il y a plus de liberté concernant le choix de la forme du bâtiment sans pénalité grave (hypothermie ou surchauffe).

⁵⁰ Birol. T, Solar envelope and form generation in architecture, Master of architecture thesis, The Middle East Technical University, September 2003.

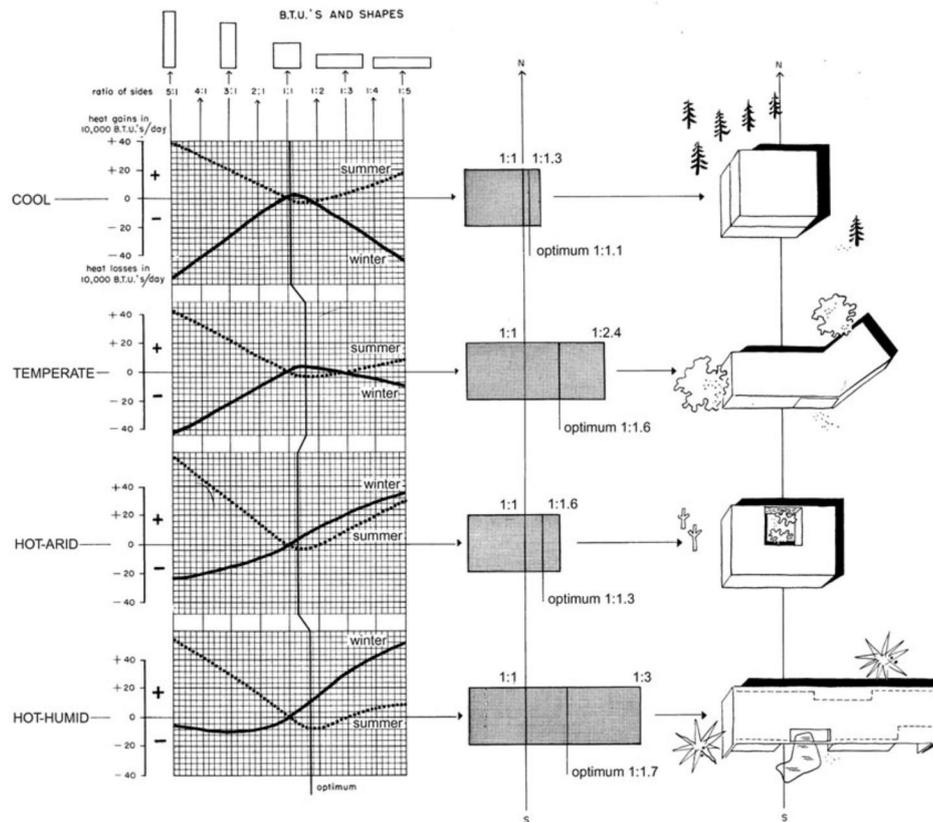


Fig.2.14 Les différentes formes dans des régions climatiques différentes (Olgyay, 1992, p.89)
Source: Birol. T (2003).

II.4.3 Orientation :

Un bâtiment linéaire orienté sur l'axe ouest-est est également recommandé quand des gains solaires sont accumulés par une façade solaire. Le problème des rayons solaires de haute altitude devrait être résolu, en particulier dans les climats tempérés. Un simple auvent traditionnel pourrait être efficace⁵¹.

La direction du vent également doit être prise en considération dans le choix de l'orientation car elle affecte les gains de la chaleur par le biais de l'enveloppe du bâtiment et par conséquent la demande du refroidissement ou du chauffage augmente⁵². Mais elle reste un paramètre secondaire parce que les façades peuvent être conçues pour détourner le flux d'air.

Un zonage bioclimatique peu être efficace pour le choix de l'orientation⁵³ : (fig.2.15)

⁵¹ Mat Santamouris (Ed) Environmental design of urban buildings : An Integrated Approach, Earthscan, London, UK, 2006

⁵² TERI et TVPL, Environmental Building Guidelines for Greater Hyderabad, 2010.

⁵³ Thierry. S, « Architecture solaire et conception climatique des bâtiments Site Internet », Architecture et énergies renouvelables" réalisé par l'Agence Méditerranéenne de l'Environnement (AME) et l'Ordre des Architectes du Languedoc-Roussillon, 25/05/2000.

- Les pièces d'activité et de regroupement qui sont occupées en permanence durant la journée devraient de préférence être orientées au sud pour bénéficier des gains solaires directs.
- Les chambres doivent être de préférence orientées au sud et surtout à l'est, profitant du lever du soleil et gardent ainsi leur fraîcheur en fin de journée.
- La cuisine de préférence orientée vers le sud-ouest, mais cette direction est souvent génératrice de la surchauffe de l'après-midi. Une serre ou une véranda placée au sud est une solution indéniable qui permet de créer un espace intermédiaire entre l'intérieur et l'extérieur ainsi que, apporte de la chaleur en hiver. Elle doit être de préférence suffisamment grande pour pouvoir y prendre des repas et accessible depuis le séjour, la cuisine et les chambres.
- Les espaces tampons (entrée, atelier, garage, salle de bain, WC) sont orientés à l'ouest ou au nord car ils n'exigent pas les gains solaires et en même temps ils servent comme des espaces intermédiaires qui isolent l'intérieure de l'extérieure.
- Un sas d'entrée sera recommandé pour empêcher que l'air froid ne pénètre dans la maison.

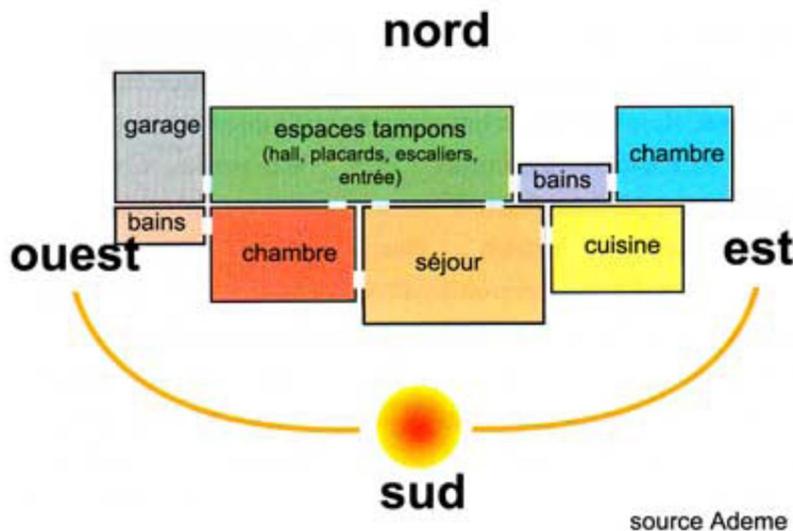


Fig.2.15 : Zonage bioclimatique pour les différents espaces d'une maison. Source: <http://www.hespul.org/L-architecture-bioclimatique.html>

Conventionnellement, la construction du bâtiment et « *L'étude de l'orientation entraine souvent une confusion de différents concepts. Il est important de bien distinguer*

l'éclairément, l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage d'une pièce et l'ensoleillement synonyme de qualité spatiale⁵⁴».

II.4.4 La masse thermique :

La masse thermique est la capacité d'un matériau de construction de stocker l'énergie calorifique pour équilibrer les fluctuations en termes d'énergie calorifique ou la température ambiante dans le bâtiment causé par les variations de la température de l'air extérieure⁵⁵. Elle a également la capacité de gâcher ou retarder les charges du chauffage et de refroidissement⁵⁶. La masse thermique comprend les murs en maçonnerie lourde avec l'isolation extérieure, les planchers en béton, et les toits en béton...etc.

es matériaux sont classifiés dans deux types : systèmes lourds qui sont principalement composés de la maçonnerie comme la brique, le béton ou la terre, et qui répondent lentement aux gains de la chaleur grâce à leur capacité thermique élevée et les systèmes légers, tels que le bois de construction, l'acier et le verre et qui réagissent rapidement aux changements entre les conditions intérieures et extérieures⁵⁷. Les systèmes lourds sont adéquats pour une occupation permanente, alors que systèmes légers sont appropriés pour une occupation à court terme⁵⁸.

L'approche légère est avantageuse pour les climats modérés où le contrôle microclimatique peut être utilisé dans la modération des températures et les mesures adaptatives peuvent être utilisées par les occupants dans les conditions extrêmes. Les températures intérieures de ces bâtiments atteignent leurs valeurs maximales deux heures après les températures maximales externes. Cela signifie que ces bâtiments refroidiront rapidement pendant la nuit. Par contre dans l'approche lourde les températures intérieures dans les bâtiments atteignent leurs valeurs maximales sept heures après les températures maximales externes (fig.2.16).

II.4.5 Fenêtrage «fenestration» :

La fenêtre constitue l'élément essentiel de l'approche passive de la conception bioclimatique. Sa conception et son emplacement est un travail de l'architecte. La

⁵⁴ Roberto. G et Karl J. H, Architecture et efficacité énergétique, principes de conception et de construction, Birkhauser Verlag AG, Berlin, Allemagne, 2008. P.94

⁵⁵ TERI and TVPL ,Environmental Building Guidelines for Greater Hyderabad — Ver. 1.2(2010)

⁵⁶ Visitsak. S, An evaluation of the bioclimatic chart for classifying design strategies for a thermostatically-controlled residence in selected climates, These de doctorat, Texas A&M University,2007

⁵⁷ Hyde. R(ed), Bioclimatic Housing, Innovative designs for warm climates, USA, 2008.

⁵⁸ Mat Santamouris (Ed) ,Environmental design of urban buildings : An Integrated Approach, Earthscan,London,UK, 2006

conception de la fenêtre au passé était basée sur l'orientation pour laisser passer la lumière naturelle et le soleil. De nos jours, cette approche est très simpliste car la fenêtre doit répondre à plusieurs fonctions importantes et chacune de ces fonctions est liée à un effet indésirable⁵⁹, comme le montre le tableau 2.3.

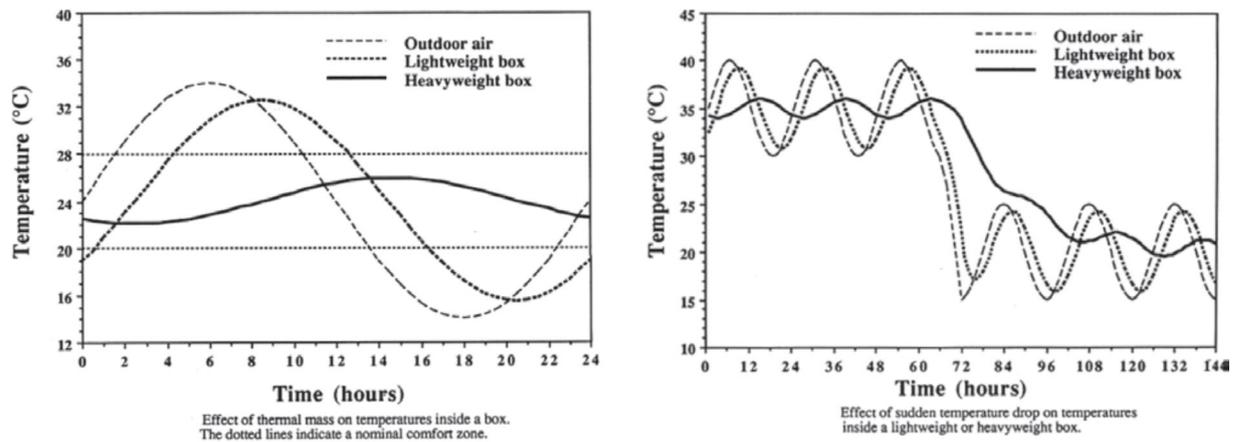


Fig 2.16 : effet de la masse sur la température
Source: Hyde (2008).

Fonctions	Buts recherchés	Effets non souhaités
Vue	Contact avec l'extérieur	Perte de confidentialité
Fermeture / Ouverture	Étanchéité + Résistance	Agressions diverses
Contrôle social	Vue vers l'extérieur	Vue vers l'intérieur
Lumière	Éclairage naturel	Eblouissement
Chaleur	Gains solaires	Surchauffes / Pertes excessives
Aération	Apport d'air neuf	Pertes par ventilation

Tableau 2.3 Les fonction d'une fenêtre. Source : Gay. J (2001)

Avoir des grandes fenêtres est souvent souhaitable ; mais sans une bonne conception, les grandes fenêtres peuvent engendrer des problèmes graves soit en été soit en hiver. En été, si les fenêtres ne sont pas correctement ombragées, elles deviennent la source principale des gains de la chaleur solaire qui engendrent la surchauffe, alors que, en hiver, une quantité importante de la chaleur interne s'échappe à l'extérieur par ces grandes fenêtres si le verre n'est pas traité correctement⁶⁰. La surface du vitrage est également un élément critique dans les conceptions des fenêtres. Son choix dépend surtout de l'orientation⁶¹. (Tableau 2.4)

⁵⁹ Gay. J, « Fenêtres et protections solaires », Cours du Master en Architecture et Développement Durable, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001.

⁶⁰ Hyde. R(ed), *Bioclimatic Housing, Innovative designs for warm climates*, USA, 2008.

⁶¹ Andy. L, passive solar design, energetechs, document pdf, 2009.

orientation	S vitrage /S plancher (%)
Sud	7-12 %
Est	< 4 %
Ouest	< 2 %
Nord	< 4 %

Tableau.2.4 Surface du vitrage selon l'orientation
Source: Andy. L (2009)

Rassam (2004), stipule que le coefficient de gain de la chaleur solaire d'une fenêtre (SHGC) et le coefficient d'ombrage (SC) déterminent la transmittance de gain de la chaleur totale de la fenêtre⁶².

II.4.6 L'isolation thermique:

L'isolation thermique est une stratégie primaire d'éviter la perte de chaleur dans les bâtiments. Selon Straaten (1967), un isolant thermique pour les bâtiments est chaque matériau qui peut bloquer le transfert de chaleur dont la valeur de conductivité thermique ne dépasse pas 0.5 Btu/ft².⁶³

Il est important de considérer les niveaux d'isolation quand la charge thermique représente un pourcentage important de la facture d'énergie. Deux stratégies sont à distinguer :

Dans les cas où les gains internes sont hauts, éviter le besoin de refroidissement, plutôt que minimiser la perte de chaleur sera le centre de la stratégie d'économie d'énergie⁶⁴. Par contre, dans les climats froids l'isolation thermique est désirée principalement en raison de la longue durée d'hiver. Le but ici est d'éviter la condensation qui a des impacts nocifs sur la qualité de l'air à l'intérieur des locaux et la santé des habitants.

Il y a trois types d'isolation à distinguer⁶⁵ :

- L'isolation réfléchissante : utilisation du papier aluminium qui reflète la chaleur radiante.
- l'isolation résistive : des lames d'air dans les matériaux sont utilisées pour résister au transfert de chaleur par conduction et par convection à travers le tissu du matériau. Par exemple la cellulose, la laine et fibre de verre.
- L'isolation capacitive : l'utilisation de la masse thermique pour augmenter le délai de la traversée de la chaleur à travers les murs est une stratégie d'isolation à

⁶² Çacri. Ç, Assessing thermal comfort conditions, Master thesis, Middle East University, December, 2006.

⁶³ ibid

⁶⁴ Mat Santamouris (Ed) Environmental design of urban buildings : An Integrated Approach, Earthscan, London, UK, 2006

⁶⁵ Hyde. R(ed), Bioclimatic Housing, Innovative designs for warm climates, USA, 2008.

condition que les murs et les toits aient une masse suffisante ; un délai de huit heures ou de plus est nécessaire.

La masse thermique ne peut pas remplacer l'isolation et un matériau dont la masse thermique est élevée n'est pas habituellement un bon isolant thermique. Les architectes devraient employer l'isolation en combinaison avec la masse thermique. Cette masse de stockage devrait être placée vers l'intérieur dans les bâtiments refroidis passivement⁶⁶.

L'isolation est évaluée selon sa valeur R ou sa valeur U. Une valeur élevée de R est bonne pour le contrôle de l'écoulement de la chaleur alors que l'inverse est vrai si une valeur U est employée. Le tableau (2.5) montre le niveau de l'isolation requis.

Dans les années récentes l'isolation réglable est employée comme stratégie dans la conception bioclimatique. Par exemple les façades en double peau partiellement équipées avec des volets (flapes) motorisés qui coupent les prises d'air pour le bâtiment et créent de ce fait un « l'effet du jardin d'hiver » en empêchant la perte de chaleur du bâtiment au cours des périodes du rayonnement solaire. Les volets peuvent être ouverts quand les températures extérieures sont hautes, et cela évite la surchauffe des espaces intérieurs⁶⁷.

	Heat gain (W/m ²)	Admittance (W/m ² /K)	Temperature difference (K)
Environmental loads			
Solar radiation	1000		
Building envelope			
Roof (skillion): tile, cavity, plasterboard, without insulation	65	2.6	25
Roof (skillion): tile, cavity, plasterboard, with insulation	25	1	25
External walls: unshaded, solid brick	105	4.2	25
External walls: unshaded, brick veneer: single brick, 100mm, cavity 50mm, stud frame and plasterboard.	55	2.2	25
Windows: unshaded, single glazed, clear glass, aluminium frames	150	6	25
Windows: unshaded, single glazed, heat reflecting glass, aluminium frames	130	5.2	25
Roof lights: unshaded clear glass	142.5	5.7	25
Roof lights: plastic dome, double skin	80	3.2	25

Tableau.2.5 Le niveau d'isolation requis. Source: Source: Hyde (2008)

⁶⁶ TERI et TVPL, *Environmental Building Guidelines for Greater Hyderabad*, 2010.

⁶⁷ Michael. B et al, *Green Building – Guidebook for Sustainable Architecture*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

II.4.7 La ventilation naturelle :

La ventilation vient du mot latin « ventus » qui signifie le mouvement d'air, (Watson et Labs, 1983)⁶⁸. Les études ont lié les taux élevés d'air frais avec la santé accrue des occupants (Fanger, 2006)⁶⁹. La ventilation naturelle est le cœur de la conception bioclimatique surtout dans les climats chauds.

La ventilation naturelle est nécessaire⁷⁰ :

- pour fournir l'air frais (santé).
- pour fournir le mouvement d'air nécessaire pour le refroidissement évaporatif convectif du corps humain (confort).
- pour dissiper la chaleur d'un bâtiment sans besoin de climatisation (économie d'énergie).

Les stratégies de ventilation naturelle se servent de deux générateurs du mouvement d'air : l'effet de cheminée (ou flottabilité) où l'air chaud se lève et le vent qui produit des mouvements d'air provoqués par des différences de pression à travers ou dans le bâtiment⁷¹.

La ventilation par effet de cheminée a lieu toujours entre une ouverture inférieure et une ouverture supérieure par l'action de flottabilité d'air chaud. Cela est dû à la différence de pression engendrée par la différence de densité entre l'air chaud et l'air froid : si l'air se réchauffe, une dépression se créera dans les zones basses d'un espace et une surpression dans les zones hautes. Si des ouvertures sont placées dans ces deux zones, les ouvertures basses aspirent l'air extérieur frais et les ouvertures hautes expulsent vers l'extérieur l'air intérieur trop chaud. L'air chaud, sous l'effet de la poussée d'Archimède s'élève tandis que l'air froid plus dense, descend. (Voir fig.2.17).

La ventilation par effet du vent : Elle s'appelle également « la ventilation traversante ». Le vent est souvent imprévisible. C'est pour cette raison, il faut commencer par une analyse du site qui permet d'extraire des informations concernant la direction du vent, sa vitesse et surtout si y a-t-il des brises dominantes fraîches en période estivale. Dans ce type de ventilation l'air entre par une façade, traverse l'ensemble du bâtiment et sort par

⁶⁸ Visitsak, S, An evaluation of the bioclimatic chart for classifying design strategies for a thermostatically-controlled residence in selected climates, Thèse de doctorat, Texas A&M University, 2007, P.30.

⁶⁹ Ministry for the Environment, Passive Solar Design Guidance, Wellington, New Zealand, 2008.

⁷⁰ Mat Santamouris (Ed) Environmental design of urban buildings : An Integrated Approach, Earthscan, London, UK, 2006

⁷¹ Ministry for the Environment, Passive Solar Design Guidance, Wellington, New Zealand, 2008.

une façade opposée. La circulation d'air à l'intérieur du bâtiment est provoquée principalement par le vent. (fig.2.18).

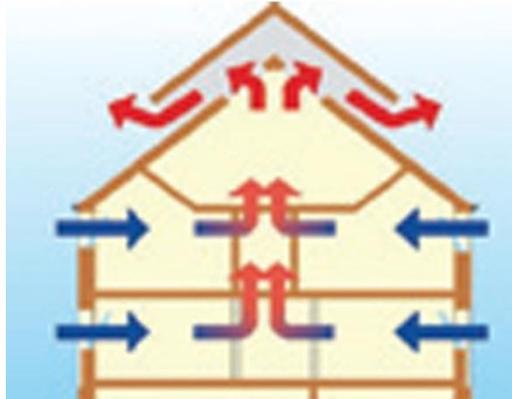


Fig.2.17 effet de cheminée

Source : L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (2008)

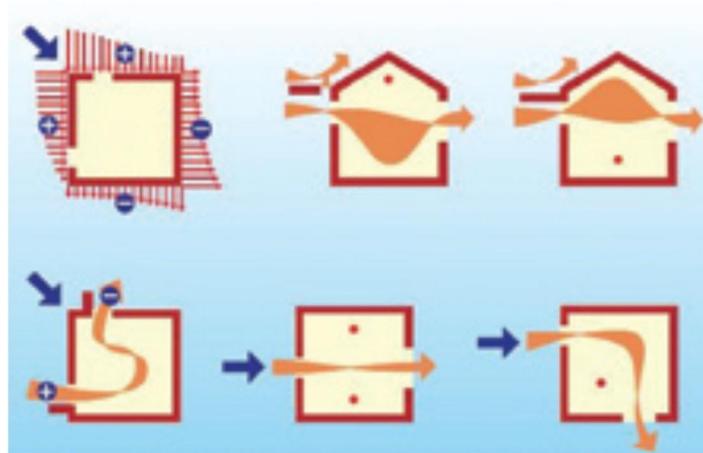


Fig.2.18 effet de vent sur la ventilation naturelle

Source : L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (2008)

La ventilation par effet de vent est susceptible d'être plus avantageuse que celle par effet de cheminée. C'est pourquoi, elle contribue à fournir des taux de ventilation élevés. Cependant, au cours des périodes où le vent se fait très rare, l'effet de cheminée peut fournir la seule source du mouvement d'air⁷².

II.4.8 Le refroidissement passif :

Le refroidissement passif est défini comme étant le processus de la dissipation de la chaleur qui se produit naturellement. Avant l'arrivée de la nouvelle technologie du

⁷² Mat Santamouris (Ed) ,Environmental design of urban buildings : An Integrated Approach, Earthscan,London,UK, 2006

refroidissement dans les climats chauds, les gens ont utilisé des méthodes naturelles comme les brises qui traversent les fenêtres, les points d'eau et les fontaines, ainsi que la pierre et la terre qui absorbent la chaleur. Ces méthodes ont été développées des milliers d'années en tant que parties intégrales de la conception des maisons⁷³. Les différentes stratégies pour le refroidissement passif sont résumées dans l'ouvrage d'Almusaed Amjad (2011) ; voir annexe 1.

II.5 Conclusion :

Ce chapitre a abordé deux axes. Le premier axe a dressé en détail la notion du climat et sa relation avec la construction alors que le deuxième axe a abordé les différents éléments qui se rapportent à la conception bioclimatique qui sont le produit de la décision de l'architecte.

Dans les années 60, le courant « environnementaliste » a commencé et le terme bioclimatique a vu le jour. L'architecture bioclimatique n'est pas une invention nouvelle, elle n'est qu'une redécouverte de principes très anciens relevant de l'architecture vernaculaire. L'architecture bioclimatique recherche un équilibre entre le bâtiment, le milieu physique et les modes et rythmes de vie des habitants. L'homme du passé a observé les influences du milieu physique qui lui étaient favorables et a produit un type de construction à bien des égards exemplaires. Il est à noter que ces derniers nous donnent des leçons gratuites sur les stratégies conceptuelles employées pour réaliser une construction bioclimatique. L'architecte doit maîtriser les stratégies de la conception bioclimatique en utilisant à son avantage le climat et l'environnement et composer avec ces derniers et non se battre contre eux.

L'architecture bioclimatique est déterminée par une série de facteurs dont un seul ne varie jamais, le climat. Il est à noter que les variables climatiques sont déterministes et inchangeables et souvent interactives et conflictuelles, ce qui rend leur intégration dans le processus de conception dans sa totalité difficile. Intégrer l'ensemble de ces contraintes en préalable à la conception architecturale est indispensable pour réussir le projet architectural. De ce fait, l'architecte doit avoir une bonne connaissance et maîtrise de ces variables.

⁷³ Almusaed. A, Biophilic and Bioclimatic Architecture, Springer-Verlag, London, 2011.

Chapitre trois

Méthodes systémiques en conception bioclimatique.

II.1 Introduction :

L'architecture du vingtième siècle, dite « internationale » se caractérisait, au moins du côté historique, par une importance exagérée accordée à la technologie et, de ce fait, peu d'attention a été prêtée à la diversité et au caractère particulier des climats et des solutions de conception régionales. Après la crise énergétique des années 70, Les tentatives des concepteurs et chercheurs pour faire revivre la réconciliation entre l'architecture et le climat en vue d'atteindre des ambiances intérieures confortables, se sont matérialisé par l'émergence de nouveaux vocabulaires et concepts, voire de nouvelles méthodes de conceptions. Ces nouvelles méthodes de conception tentent de s'intégrer dans une démarche plus holistique.

Dans ce chapitre nous aborderons, dans le premier axe, un état de l'art des méthodes de conception systémiques qui ont tenté d'intégrer la composante climatique dans le processus de conception architecturale, alors que le deuxième axe dressera un panorama des méthodes récentes du processus de conception intégrée.

II.2 Les méthodes systématiques :

Il est reconnu que les architectes ont tendance à négliger la composante climatique dans le processus de conception architecturale. La fig.3.1 ci-dessous présente le processus de conception conventionnel.

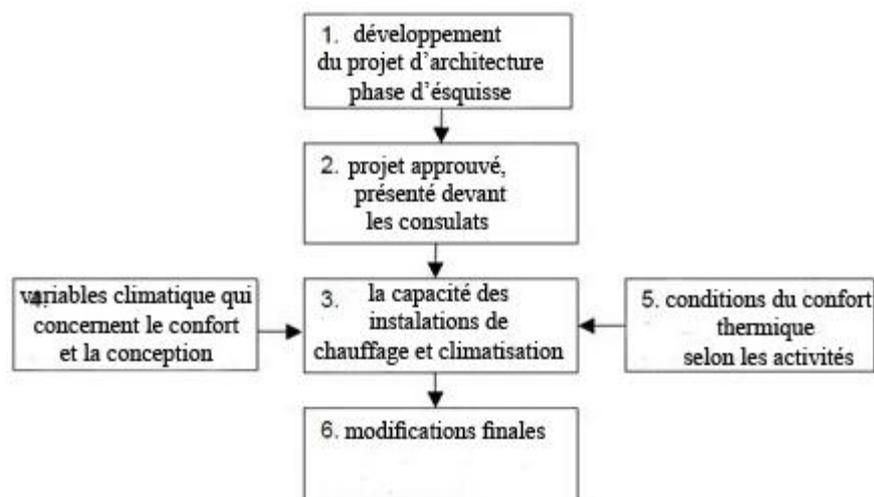


Fig.3.1 processus conventionnel de la conception architecturale. Source : Evans (2007)

D'après la fig.3.1, on remarque que les décisions des architectes concernant les variables climatiques viennent après que l'esquisse ait été faite et le projet approuvé. Cette situation a stimulé quelques chercheurs d'essayer de trouver un remède à ce problème.

II.2.1 La méthode d'Olgyay :

La méthode d'Olgyay fut la première procédure systématique de l'intégration du savoir climatique et environnemental dans le processus de la conception architecturale. Olgyay (1962) se réfère aux paroles de Le Corbusier, où il a souligné que l'adaptation d'un bâtiment à son environnement fût un problème pendant des siècles. Le Corbusier a dit « *La symphonie du climat ... n'a pas été comprise ... Le soleil diffère le long de la courbure du méridien, son intensité varie sur la croûte de la terre en fonction de son incidence ... Dans ce jeu, de nombreuses conditions sont créées et qui attendent des solutions adéquates. C'est à ce moment qu'un régionalisme authentique ait sa place.* »¹

En adoptant les recherches faites par Houghton et Yaglou (1923) aux Etats-Unis², la méthode d'Olgyay a été élaborée au moyen d'essais expérimentaux dans des zones climatiques aux Etats-Unis. Elle est basée sur la zone de confort en fonction des paramètres climatiques : température ambiante, l'humidité, la vitesse de l'air et la température radiante moyenne, le rayonnement solaire et le refroidissement par évaporation³.

Avec une humidité relative sur l'échelle horizontale et la température sur l'échelle verticale, Olgyay (1962) a montré trois zones : les conditions extérieures du climat, la zone du confort au centre avec une zone de confort d'hiver et une autre d'été indiquées séparément prenant en compte les adaptations saisonnières. Voir (fig.3.2).

La zone de confort déterminée par Olgyay définit les conditions dans lesquelles l'homme réussit à arriver au « *point à partir duquel un minimum de dépenses énergétique est nécessaire pour s'adapter à son environnement* »⁴.

La limite inférieure de la zone du confort est également la zone limite au dessus de laquelle il est nécessaire de fournir l'ombrage. Avec des températures supérieures au niveau du confort, le diagramme indique la vitesse d'air nécessaire pour rétablir le confort en relation avec l'humidité. Si la situation dominante est chaude et sèche, le diagramme

¹Nahla. E, Bioclimatic architecture in Libya: case studies from three climatic regions, Master's thesis, Middles East Technical University, 2007.

² Evans. J. M, The comfort triangles: a new tool for bioclimatic design, thèse de doctorat, Delft University, 2007.

³ Olgyay. V, Design with climate, Princeton University Press, New Jersey, 1962.

⁴ Ibid.

indique le refroidissement par évaporation nécessaire pour arriver au confort. Le rayonnement solaire est exigé quand la température ambiante sèche est basse.

La méthode se déroule comme suit : Les données climatiques au niveau régional et local sont analysées sur une base annuelle et mises sous forme graphique indiquant la distribution annuelle des éléments climatiques. La superposition des données, spécialement la température de l'air et l'humidité relative sur le diagramme bioclimatique permet de déterminer les conditions de confort. Enfin les mesures correctives seront déterminées comme la forme, l'orientation, et l'ombrage.

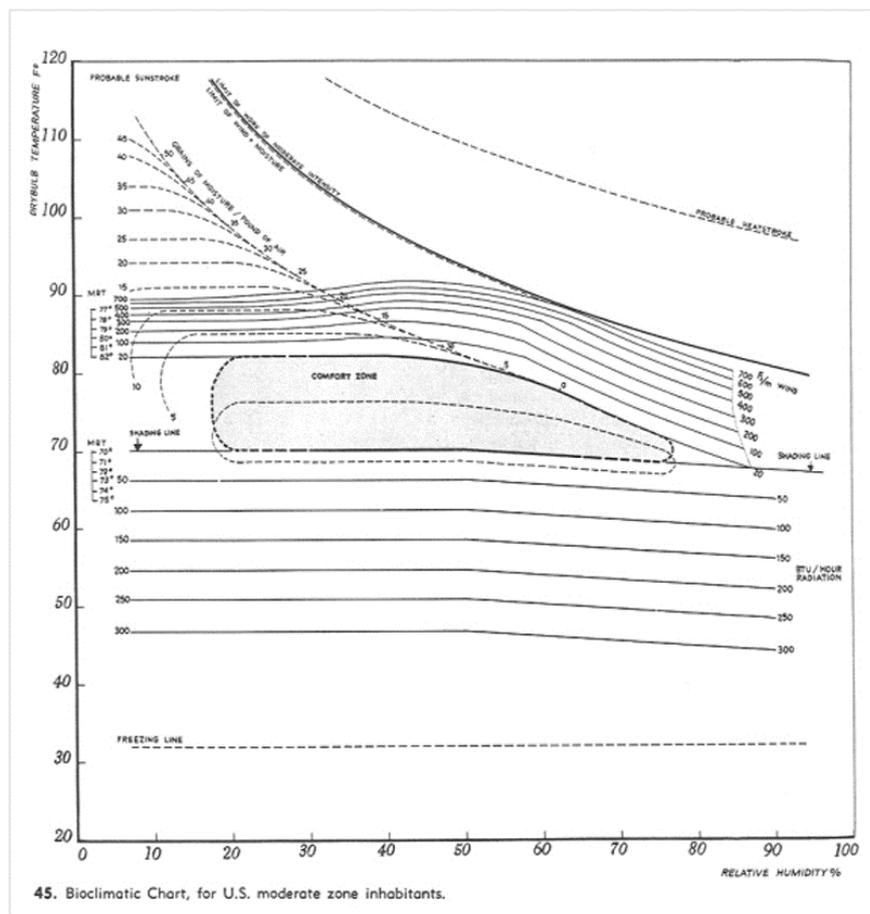


Fig.3.2 : Le diagramme bioclimatique d'Olgay. Source: Olgay (1962).

II.2.2 Diagramme bioclimatique de B. Givoni :

Givoni (1978) a remis en cause le diagramme d'Olgay du fait que l'application de cette méthode est valable juste pour les climats chauds et humides et les constructions légères seulement⁵. Givoni a étudié les différents indices thermiques qui affectent le confort

⁵ Givoni. B, L'homme, L'architecture et le climat, édition le Moniteur, paris, 1978.

humain et il a employé ses résultats pour construire un indice de stress thermique (Index of Thermal Stress « I.T.S. »).

Au lieu d'utiliser les températures extérieures pour construire son diagramme comme dans le diagramme d'Olgay, Givoni a employé les températures intérieures qui peuvent être affectées par les différentes stratégies de conception passive.

Il a basé son étude sur la relation linéaire entre l'amplitude de la température et la pression de la vapeur d'air extérieur dans des diverses régions. Dans son diagramme et selon le rapport entre la pression de vapeur mensuelle moyenne et l'amplitude de la température de l'air extérieur, les stratégies passives appropriées sont définies selon les conditions climatiques régnantes en dehors de l'enveloppe du bâtiment. Ces stratégies sont : le refroidissement évaporatif direct, l'inertie thermique, le refroidissement par ventilation nocturne et le chauffage passif. Voir (fig.3.3).

En 1979, Milne et Givoni ont combiné les différentes stratégies de conception adoptées dans l'étude précédente de Givoni sur le même diagramme⁶. « Ce diagramme est établi pour des sujets acclimatés, au repos ou engagés dans une activité sédentaire, avec une tenue vestimentaire adaptée »⁷.

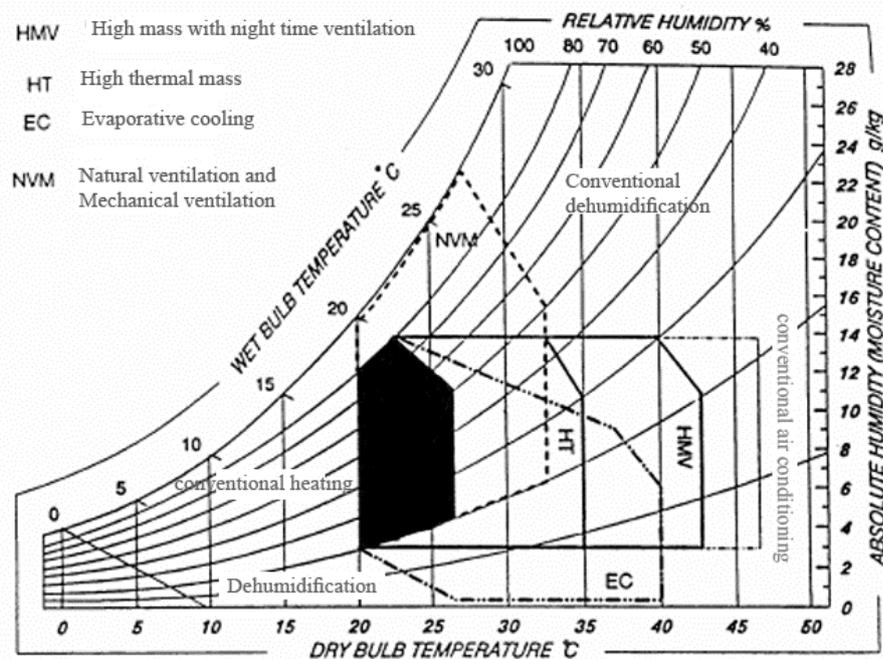


Fig.3.3 Diagramme de Givoni. Source : Çacri (2006)

⁶ Sopa, V and Jeff, S, « An analysis of design strategies for climat-controlled residences in selected climates », IBPSA-USA National Conference Boulder, CO, August 4-6, 2004.

⁷ Chatelet, A et al, Architecture climatique : une contribution au développement durable. Tome2 : concepts et dispositifs, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998. p20

Givoni recommande l'utilisation des valeurs maximales comme indicateurs des stratégies de la conception bioclimatique. Il préconise deux approches de refroidissement passif. La figure (3.4) montre les stratégies passives établies par Milne et Givoni qui sont⁸ :

- zone de confort en air calme.
- zone d'influence de la vitesse d'air : il s'agit de l'effet de la vitesse de l'air sur l'évaporation cutanée, des échanges par convection. La vitesse de l'air peut être obtenue par l'utilisation des ventilateurs. Cette stratégie sert à retarder l'apparition de la condensation.
- Une double-zone d'influence des inerties : il s'agit des caractéristiques inertielles du bâtiment qui réduisent les oscillations de la température intérieure dans les périodes estivales et hivernales. Cette zone comprend deux zones ; une zone concerne les températures hautes et l'autre représente les températures basses.
- Zone d'influence d'une ventilation nocturne importante liée à une forte inertie par absorption : Cette zone s'agit des caractéristiques inertielles du bâtiment, et ses possibilités de renouvellement d'air lorsque il est plus froid à l'extérieure qu'à l'intérieure. Elle est d'autant plus importante que le cycle jour/nuit est contrasté.
- zone d'influence d'un refroidissement par évaporation, est relative uniquement de l'état hygrométrique de l'air ayant une grande capacité d'absorption de la vapeur d'eau.
- zone d'influence de captage solaire passif, elle n'a d'intérêt que pour les basses températures. Elle concerne les possibilités de captage par les vitrages du bâtiment. Cette zone est liée à l'inertie par absorption intérieur du bâtiment.
- les zones d'obtention artificielle du confort thermique :
 - Pour les climats chauds et humides : une zone de déshumidification permet d'atteindre le confort;
 - Pour les climats chauds et plus sec : une zone de refroidissement est nécessaire ;
 - Pour les climats froids : une zone de chauffage est nécessaire pour atteindre le confort optimal.

L'intérêt principal du diagramme de Milne et Givoni c'est l'introduction du refroidissement passif pour fournir le confort intérieur dans des climats chauds sans avoir recours à la climatisation (Givoni 1998). Le diagramme permet également d'atteindre une

⁸ Ibid

situation de confort si le bâtiment emploie la ventilation naturelle dans la condition où l'humidité relative et la température intérieure sont plus élevées⁹.

Givoni (1994) a stipulé que les diagrammes d'ASHRAE (1992) sont utilisables seulement dans les bâtiments climatisés et, par conséquent, ils sont inadéquats pour les bâtiments passifs dans les climats très chauds. Cette argumentation a gagné de la crédibilité ces dernières années en raison du travail de Nicol (1993), de De Dear (1998) et, en particulier, de De Dear et de Brager (2001), et elle est soutenue par la théorie de confort thermique adaptatif. La théorie de l'adaptation reconnaît que, comme Givoni affirme, les individus vivant dans les pays très chauds se sentent plus confortables à des températures élevées que ceux qui vivent dans un climat tempéré¹⁰.

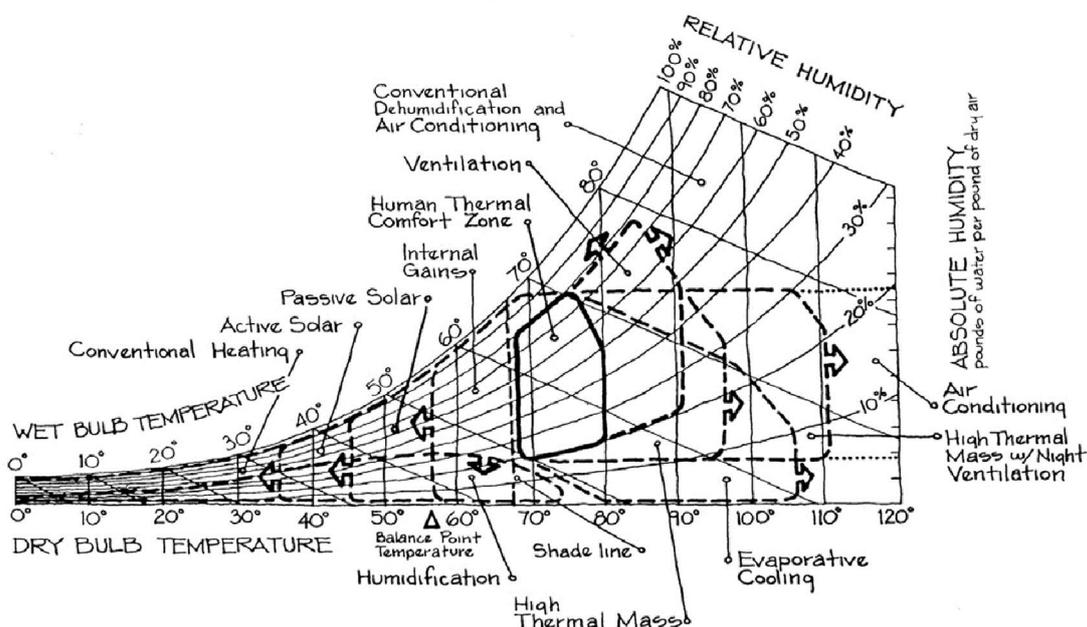


Fig.3.4 Givoni-Milne bioclimatic chart. Source: Sopa. V and Jeff. S (2004)

Le diagramme de Givoni stipule que le confort est atteint dans deux conditions :

- l'air calme ($< 0.25\text{m/s}$) : la zone de confort se trouve entre 20 C° (en hiver) et 27 C° (en été) avec des limites supérieures placées sur une humidité relative de 80%.
- une brise d'air très légère : la zone de confort se prolonge jusqu'à 30 C° avec des limites supérieures placées sur une humidité relative de 90%. Voir (fig.3.5).

Pour employer les diagrammes de Givoni on a besoins de suivre les étapes suivantes :

⁹ Sreshthaputra. A. Building design and operation, for improving thermal comfort in natural ventilated buildings in hot humid climate, Thèse de doctorat, Texas A&M University, USA, 2003.

¹⁰ Lomas. K, et al. "Building bioclimatic charts for non-domestic buildings and passive downdraught evaporative cooling", Building and Environment, 2004, 661 – 676.

- Récolter les données climatiques les plus contraignantes sur une base diurne (températures minimales, températures maximales, humidité minimale et maximale)
- Déterminer la zone du confort : on doit représenter les 12 mois par des segments dont les deux points ont les coordonnées (T.min, Hr.max) (T.max, Hr.min).
- Déterminer les mesures techniques et dispositifs nécessaires qui doivent être intégrés dans le processus de la conception architecturale.

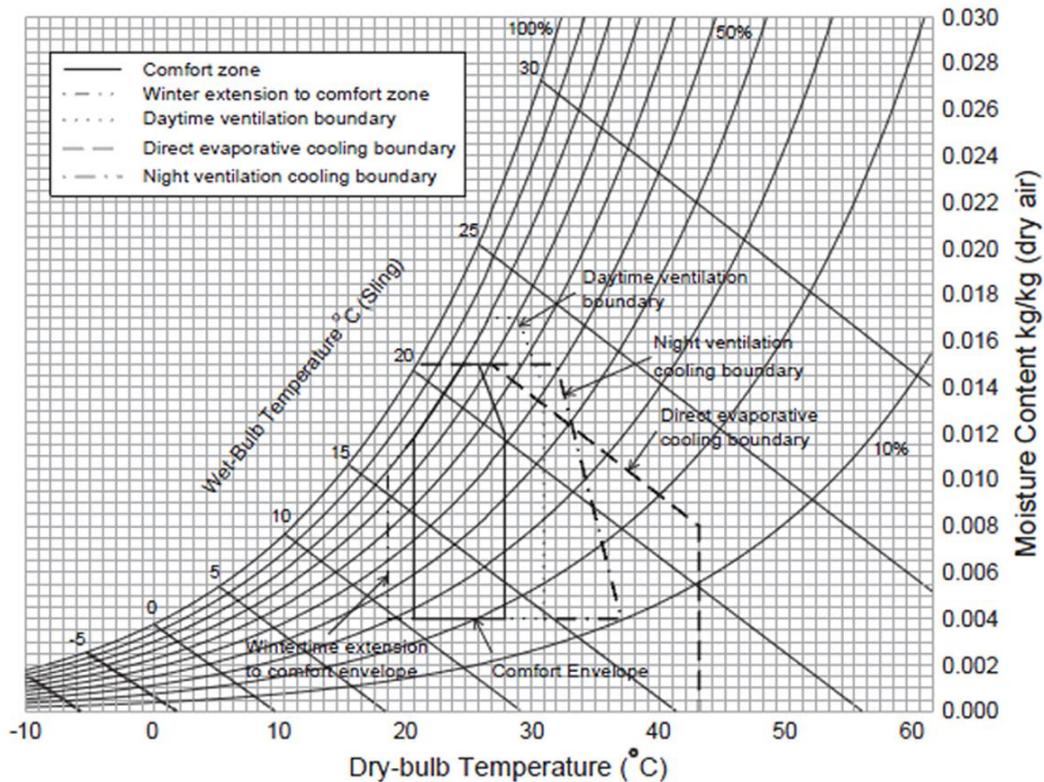


Fig.3.5 Diagramme bioclimatique de Givoni pour les pays développés (1992)
Source : Lomas et al (2004)

II.2.3 La méthode de Szokolay:

En se basant sur les recherches d'Humphrey et Auliciems (la température neutre « TN » et la température effective « SET »), les normes ASHRAEA et les travaux antérieurs d'Olgay et de Givoni, Steeve Szokolay (1986) a défini une zone de confort « la zone neutre » avec diverses zones de contrôle potentiel en fonction des données climatiques et météorologiques de la région d'étude¹¹. Voir (fig 3.6).

¹¹ Anir K. U, "Thermal mass requirement for building envelope in different climatic conditions", 14th International Brick & Block Masonry Conference, Sydney, Australia, February 17-20, 2008.

Les mesures passives déterminées par la méthode sont:¹²

- la zone de masse thermique.
- la zone de la masse exposée avec ventilation nocturne.
- chauffage solaire passif.
- la zone de ventilation naturelle.
- la zone de refroidissement évaporatif direct.
- la zone de refroidissement évaporatif indirecte.

En 1980, M. Evans et S. V. Szocolay ont critiqué les outils précédemment proposés à cause de l'incohérence entre les résultats du confort thermique calculé et le confort réel perçu par les sujets. A cet effet, une zone de confort propre à chaque région, et qui tient compte des caractéristiques du climat local a été définie.

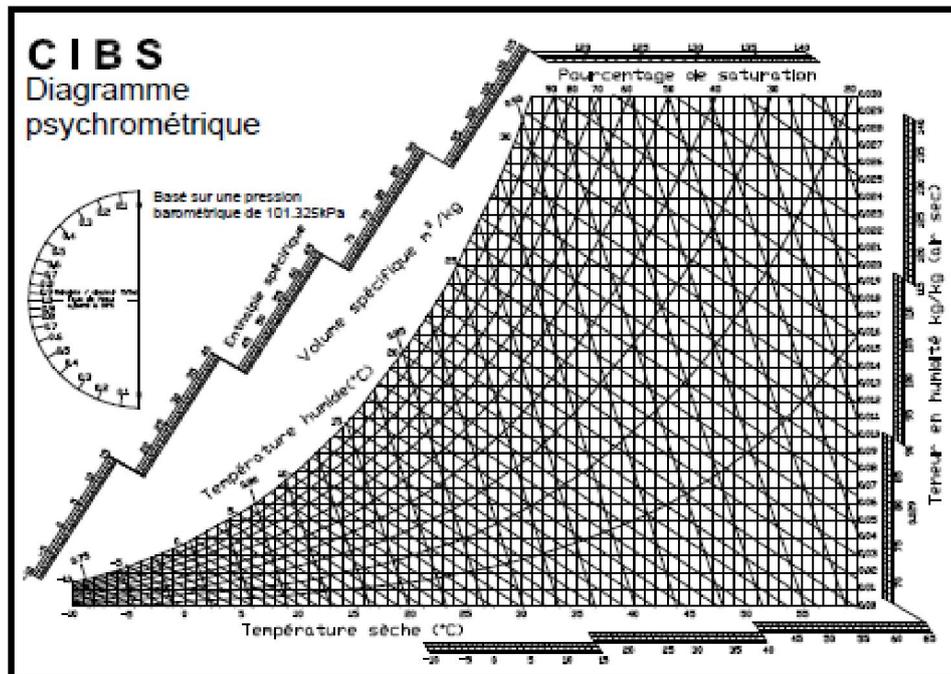


Fig.3.6 Diagramme psychrométrique de S. Szocolay
Source : Szokolay, S et Auliciems, A (2007)

Le diagramme de S. Zokolay prend en considération la zone de confort y compris les zones de performance spécifique de chaque région définies par les données climatiques et

¹² AL-Shibami, F, "Formulating Passive Measures to Achieve Thermal Comfort and Energy Efficiency in Yamen Hot Dry Region", ICCBT, 2008. pp201-208.

l'altitude, ce qui permet d'obtenir des résultats plus proches des besoins climatiques du lieu¹³.

II.2.4 Les tables de Mahoney :

Les tables de Mahoney sont une série de tables de référence d'architecture utilisées comme guide pour concevoir des bâtiments adaptés aux conditions climatiques¹⁴. Elles introduisent les recommandations nécessaires pour arriver au confort hygrothermique dans le bâtiment. Elles présentent également l'avantage d'intégrer certaines variables sociales et fonctionnelles en fonction des variations climatiques¹⁵. Elles ont été élaborées par l'architecte Carl Mahoney, qui a travaillé avec John Martin Evans et Otto Königsberger. Elles ont été publiées en 1971 par le département des Nations Unies des affaires économiques et sociales¹⁶. Le concept développé par Mahoney (1968) au Nigeria a fourni la base des tables de Mahoney¹⁷.

La méthode de C. Mahoney est basée sur un nombre important de facteurs climatiques et la durée de leur effet, tels que les températures, humidité relative, précipitation, orientation des vents, ainsi que la notion du confort diurne et nocturne.

Ces tableaux caractérisent l'impact climatique général en relation avec le confort en utilisant les indicateurs de l'aridité et de l'humidité. Evans (1999) a proposé l'ajout d'un troisième indicateur « la froideur ». Selon les conditions du confort, l'aptitude thermique, l'humidité et les précipitations mensuelles, les indicateurs d'aridité et l'humidité sont établis. Voir le tableau (3.1).

Ce tableau montre l'importance de l'oscillation moyenne de la température dans le processus pour caractériser le climat et définir les indicateurs. L'étape finale dans le processus est le choix des recommandations de conception selon le nombre de mois avec différents indicateurs. Pour des raisons pratiques concernant le processus décisionnel dans la conception, les recommandations ont été divisées en deux étapes, celles de l'esquisse qui concernent les décisions initiales sur le site, la forme du bâtiment et les espaces extérieurs et celle de conception détaillée avec des indications concernant les composantes du bâtiment¹⁸.

¹³ Chatelet. A et al, Architecture climatique : une contribution au développement durable. Tome2 : concepts et dispositifs, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998.

¹⁴ Passive Solar Addendum, document pdf, See <http://code.pediapress.com/>, 08 Mar 2011.

¹⁵ Mazouz. S, Eléments de conception architecturale, Alger: Edition O.P.U, Juillet, 2004.

¹⁶ Passive Solar Addendum, document pdf, See <http://code.pediapress.com/>, 08 Mar 2011

¹⁷ Evans, J. M, The comfort triangles: a new tool for bioclimatic design, PhD, Delft University, 2007

¹⁸ Ibid

Il y a six tableaux, dont quatre sont utilisés pour entrer les données climatiques en comparaison avec les exigences du confort thermique et deux pour les stratégies de conception à suivre. La méthode de Mahoney recommande l'utilisation des stratégies suivantes (Orientation et disposition des constructions ainsi que les éléments architectoniques et les espaces extérieurs).

indicateurs	Les conditions	Relation avec la conception
A1 : Aride 1	Groupe d'humidité = 1, 2, ou 3 oscillation mensuelle > 10° C	La capacité thermique nécessaire
A2 : Aride 2	Stress thermique de nuit = chaud et groupe d'humidité = 1 ou 2 Ou stresse thermique de jour = chaud et stresse thermique de nuit = confort et groupe d'humidité = 1 ou 2	Sommeil extérieur désirable
A3 : Aride 3	stresse thermique de jour = froid	Protection contre le froid.
H1 : Humide 1	stresse thermique de jour = confort et groupe d'humidité = 4	Mouvement d'air essentiel.
H2 : Humide 2	stresse thermique de jour = chaud et groupe d'humidité = 4 ou stresse thermique de jour = chaud et groupe d'humidité = 2 ou 3 et oscillation mensuelle < 10° C	Mouvement d'air désirable.
H3 : Humide 3	Précipitations mensuelles > 200 mm	Le besoin pour la protection contre la pluie dans les secteurs de circulation (une condition pour des écoles).

Tableau 3.1 Indicateurs définis dans les Tableaux de Mahoney. (Koenigsberger et al, 1974.)
Source : Evans (2007)

II.2.5 La méthode de Koenigsberger, Mahoney and Evans (1970) :

Koenigsberger, Mahoney and Evans (1970) ont proposé une méthode qui prend en considération les phases du projet. La méthode introduit des recommandations architecturales à chaque phase et met l'accent sur la phase d'esquisse et celle du détail. Elle met en évidence également le potentiel d'intégrer les variables climatiques dans chaque phase (voir tableau 3.2 et fig.3.7)¹⁹.

L'étape de la conception	Le potentiel d'intégrer la composante bioclimatique	Le cout de l'application des ressources bioclimatiques
Programme (localisation, type)	Très haut	bas
Conception préliminaire	haut	bas
L'esquisse	bien	bas
Développement du projet (détails)	limité	augmentation
Détails+spécifications	Très limité	Important à cause de modifications
construction	Très limité	Elevé à cause des changements
usage	Limité extrêmement	Elevé à cause des changements

Tableau 3.2 la méthode de Koenigsberger, Mahoney and Evans (1970) réadapté par l'auteur. Source: Evans2007

II.2.6 La méthode de Koenigsberger et al. Dite de « forward analysis »

La méthode a été officiellement intégrée dans la monographie des Nations Unies portant sur le climat et la conception de la maison (Koenigsberger, Mahoney, et Evans, 1971). En 1983, Koenigsberger et al ont élaboré la méthode dite « Forward Analysis » basée sur les tables de Mahoney pour l'établissement des principes de conception avec une analyse climatique préalable. La méthode vise d'insertion de la composante climatique dans le processus de conception architecturale dans sa totalité. Elle est divisée en trois phases²⁰ :

- **L'analyse préalable** : (Koenigsberger et all., 1983)

¹⁹ Evans. J. M, The comfort triangles: a new tool for bioclimatic design, thèse de doctorat, Delft University, 2007.

²⁰ Mazouz. S, Eléments de conception architecturale, Alger: Edition O.P.U, Juillet, 2004.

Dans cette phase les paramètres du climat sont traités et analysés en utilisant les tables de Mahoney. Le résultat de l'analyse est présenté sous forme de spécifications de performance. Une méthode pour l'analyse du climat régional a été proposée par Koenigsberger et al. (1983) et qui est destinée à être utilisée pendant cette phase du processus de conception.

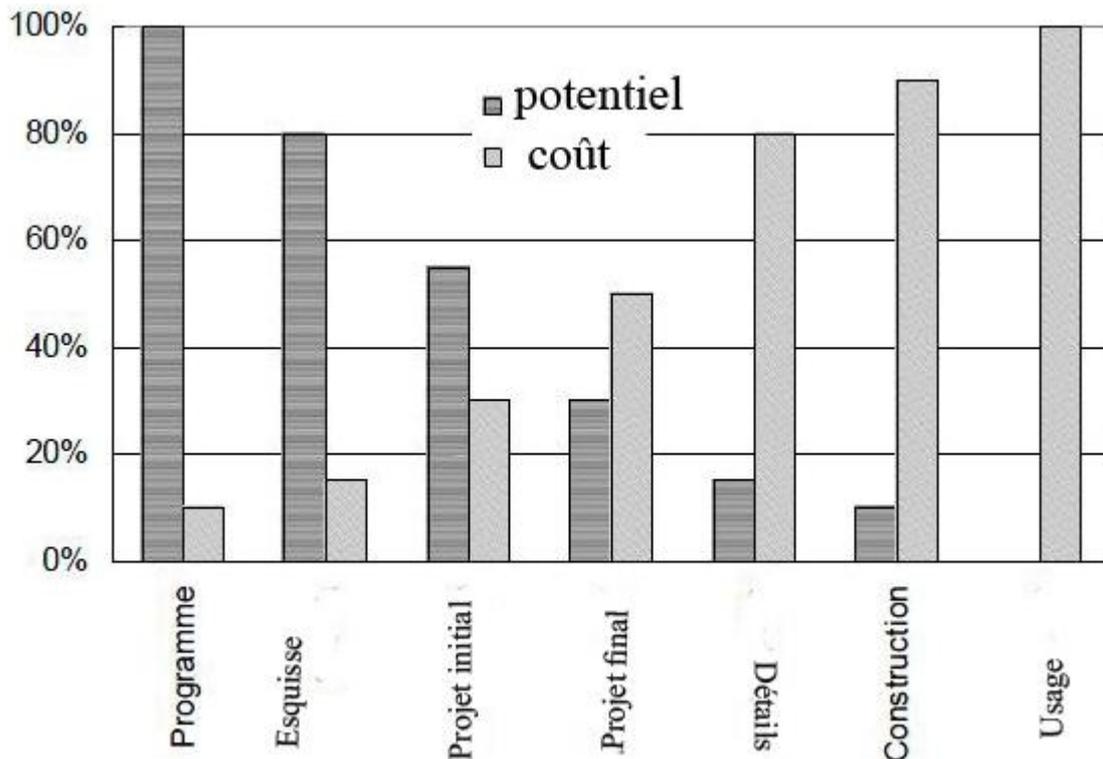


Fig.3.7 le potentiel de chaque phase de conception en termes d'économie d'énergie et le coût (Koenigsberger, Mahoney and Evans, 1970). Source : Evans (2007)

- **Le développement de l'esquisse :**

Koenigsberger et al ont introduit un certain nombre de « plans types » pour l'architecte. Ce dernier choisit un sur la base des performances spécifiques définies au cours de la phase précédente. Le « plan type » ensuite raffiné au cours des phases de conception qui suivront. Cette étape inclut la conception des contrôles solaire, les propriétés d'isolation globale, les principes de ventilation et d'adaptation des activités. Les considérations prises en compte ne sont pas seulement d'ordre climatique mais aussi d'ordre fonctionnel et social en incluant les espaces extérieurs autour du bâtiment.

- **Conception des éléments (Element design) :**

Cette étape comprend un examen et une optimisation de tous les éléments du bâtiment. A cause du caractère consécutif de cette méthode, il est difficile de faire des feedbacks après la dernière phase du processus et corriger les erreurs systémiques et juste des rectifications

sur la performance thermique peuvent être faites. Pour cette raison des outils d'aide à la décision sont adéquats pour régler ces lacunes²¹.

Koenigsberger et al (1970), Koenigberger et al (1977), Konya (1985), Lloyd Jones (1998), et autres chercheurs ont également utilisé les classifications climatiques précédentes et ont introduit des stratégies de conception bioclimatique en fonction d'un zonage climatique. Voir (tableau 3.3).

les régions climatiques	latitude	Protection solaire	L'inertie thermique	Les gains solaires	La ventilation traversée	l'isolation thermique	Les couleurs d'éclairage	La ventilation minimale	Refroidissement nocturne	La ventilation sélective
Tiède et humide	0-15°	x			x		x			
Chaud sec	20-35°	x	x				x	x	x	x
transitionnel	10-30°	x	(x)		x		x	(x)		x
mousson	5-30°	x	(x)	(x)	x		x		x	x
Haute terre équatoriale	0-20°	x	(x)			x		x		
Désert maritime	20-35	x	x		x	x	x		(x)	
Méditerranéen	30-40	x	x	x		x	x		x	x
subtropical	40-50	x	x	(x)		x		x		x
Hautes terres modérés	30-50		x	x		x		x		
tempéré	40-55			x		x		x		(x)
froid	>50°			(x)		xx		x		
Très froid	>60°			(x)		xx		xx		
Température moyenne										
réduction		x			x				x	
contrôle		x					x	x		x
augmentation				x		(x)		x		(x)
Aptitude thermique										
augmentation				x					x	x
réduction		(x)	x			x	x	x		

Tableau 3.3 stratégies de conceptions pour les différents climats. Réadapté par auteur
Source: Evans (2007)

²¹ Hans. R, " Climatic Design of Buildings using Passive Techniques", Building Issues, Volume 10, N1, 2000.

II.2.7 La méthode graphique « the confort triangles » Evans (2007)²² :

Cette méthode, à l'encontre des méthodes conventionnelles de Olgyay et Givoni qui analysent les conditions thermiques dans un moment spécifique de temps par l'emploi de deux variables, la température de l'air sec sur l'axe horizontal et l'humidité, considérée comme relative par Olgyay ou absolue par Givoni, sur l'axe vertical, définit et caractérise les variations de la température pendant un cycle quotidien et les variables indiquées sur l'axe horizontal et vertical sont la température journalière moyenne (T_m) et l'oscillation de la température journalière moyenne (A_t).

Les triangles de confort mettent l'accent sur le comportement thermique périodique d'un espace pendant un intervalle de 24 heures ou les valeurs moyennes d'une série de jours. Les deux variables choisies permettent l'analyse et la visualisation des conditions extérieures moyennes comparées à une série de conditions intérieures exigées pour assurer le confort thermique.

Selon la différence entre les conditions existantes et celles requises, les triangles de confort peuvent être appliqués pour identifier les conditions extérieures favorables pour le confort et le bien-être, aussi bien que les modifications des conditions extérieures requises quand des variables climatiques sont en dehors de la zone de confort.

Les limites de la température dans la méthode d'Evans sont basées sur des valeurs obtenues à partir des diagrammes bioclimatiques tels que ceux de Givoni et d'Olgyay. Par l'emploi de ces sources, les limites du confort sont établies pour différents niveaux d'activité, exprimés comme le rapport entre la température moyenne T_m et l'amplitude thermique A_t . Ces zones de confort sont définies et développées par rapport aux activités et aux exigences du confort dans les espaces comme suit : (voir fig.3.8)

- Les espaces de vie pour des activités sédentaires (A)
- Les espaces de sommeil (B)
- La circulation (C)
- Une zone de confort étendue (D)

La méthode du « confort triangles » propose la stratégie bioclimatique suivante quand les conditions sont en dehors de la zone de confort :

²² Evans. J. M, The confort triangles: a new tool for bioclimatic design, thèse de doctorat, Delft University, 2007.

- Utilisation du rayonnement solaire.
- Isolation thermique pour conserver des gains internes.
- Ventilation sélective : utilisation de la ventilation intermittente pour refroidir ou chauffer l'intérieur.
- Mouvement d'air sensible : mouvement d'air qui peut être ressenti grâce à l'effet de refroidissement.
- Inertie thermique

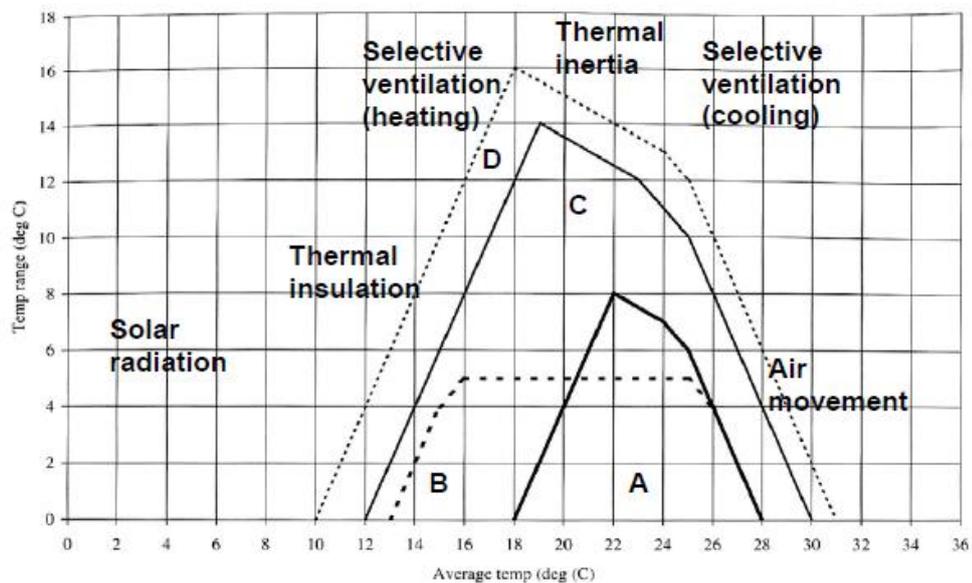


Fig. 3.8 Les triangles de confort, avec des stratégies de conception ajoutées Evans (2003).
Source : Evans (2007)

II.3 Processus de conception intégrée « Integrated Design Process »

II.3.1 Définition :

Le processus de conception intégrée « Integrated Design Process, IDP » est un concept américain qui a plusieurs synonymes dans la littérature architecturale. On trouve d'autres termes comme « Integrated Building Design, IBD », « Integrated Project Delivery, IPD », « Whole-Building Design, WBD », « Whole-Integrated Building Design, WIBD » et « Whole-Integrated Building Design Process, WIBDP », mais ils ont tous le même sens.

Selon ASHRAE, le processus de conception intégré « Integrated Building Design » est un processus collaboratif de conception et de construction qui a pour objectif des solutions optimisées. Pour que ce processus réussisse et soit bénéfique pour le projet, l'équipe entière

de la livraison du projet reste engagée et impliquée dans le processus dès le début du projet jusqu'aux opérations de construction et l'entretien d'après usage. Un processus de conception intégré décourage la philosophie séquentielle et encourage la collaboration holistique entre les membres de l'équipe du projet pendant toutes les phases de la livraison du projet. L'accent est mis sur les solutions optimales qui répondent aux objectifs définis pour le projet. Les solutions optimales exigent la participation de tous les membres de l'équipe²³.

« The whole-building design process » est une stratégie multidisciplinaire qui intègre effectivement tous les aspects du développement du site, la conception du bâtiment, la construction, et les opérations et l'entretien pour réduire au minimum la consommation de ressources et les impacts sur l'environnement.²⁴ Il s'agit de penser à toutes les phases de la conception d'un bâtiment comme un système simple, du début de l'étude et l'esquisse jusqu'à l'accomplissement du processus. La conception intégrée peut épargner l'argent, l'énergie et les frais d'exploitation et réduire les maintenances chères pendant toute la vie du bâtiment.

Selon AIA « The American Institute of Architects », l'approche « Integrated Project Delivery, IPD » est une approche de la livraison de projet qui intègre des personnes, des systèmes, des structures d'affaires et des pratiques dans un processus qui encourage le travail en équipe pour optimiser les résultats de projet, augmenter la valeur au propriétaire, réduire la perte, et maximiser l'efficacité à travers toutes les phases de la conception, de la fabrication, et de la construction. Cette approche permet d'accroître les contributions de la connaissance et d'expertise très tôt par l'aide de nouvelles technologies, ce qui permet à tous les membres de l'équipe de bien de se servir de leurs potentiels les plus élevés tout en élargissant la valeur qu'ils fournissent pendant le cycle de vie du projet.

II.3.2 Le concept du bâtiment intégré « Integrated Building

Concept, IBC » :

Ce concept inclut tous les aspects de la construction du bâtiment (architecture, façades, structure, fonction, acoustique, matériaux, utilisation d'énergie, qualité environnementale d'intérieur, etc...). Il se compose de trois parties²⁵: (voir fig.3.9)

²³Baumann, O, "Integrated Design –Delivery and Operations of Net-Zero Energy Buildings", Building Industry Day Workshop Washington, D.C. -October 15, 2009.

²⁴ Los Alamos National Laboratory Sustainable Design Guide, December 2002.

²⁵ Heiselberg, P et al, Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings. Proceedings of the 27th AIVC Conference, November 20-22, 2006, Lyon, France.

- Le concept d'architecture
- Le concept de structure
- Le concept d'énergie et d'environnement

Ce dernier concept peut être classifié selon les catégories et les paramètres suivants : Voir le tableau 3.4.

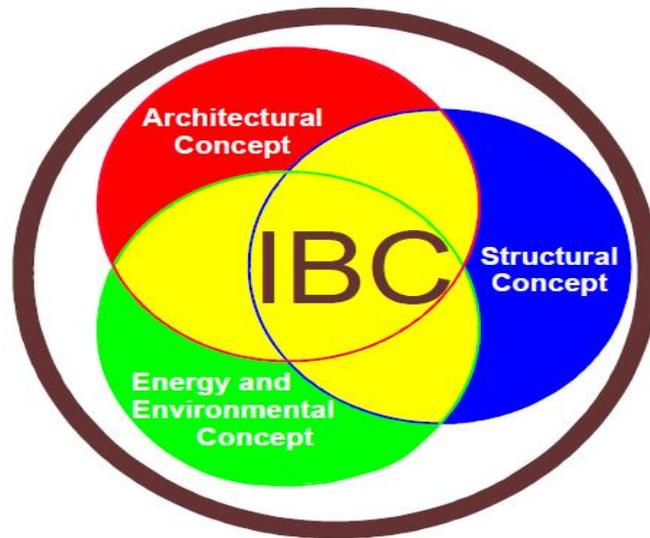


Fig.3.9 Le concept du bâtiment intégré. Source : Heiselberg, P., et al. (2006)

Catégorie	Paramètres
Climat	Modéré, froid, chaud et aride, chaud et humide,etc.
Contexte	Urbain, rurale, suburbain...etc.
Usage du bâtiment	Résidentiel, école, bureau
Type du bâtiment stratégies de réduction de la demande	Tour, barre, prototype, ... L'isolation thermique, l'étanchéité d'air, tampon, la réduction de charge de la chaleur et le contaminant, forme de bâtiment, zonage,
Stratégies de contrôle	contrôle de demande, ombrage solaire.
Technologies énergie renouvelables	Mécanisme naturel, adaptatif/rigide, contrôle de l'utilisateur /automatique Le chauffage solaire passif et actif, vent, refroidissement naturel, le chauffage / refroidissement géothermique, biomasse, lumière du jour, ventilation naturelle.
Conversion rationnelle de l'énergie	CHP, HE chaudière de gaz, pompe à chaleur
Réseau de fourniture d'énergie	Chauffage, électricité, gaz du quartier

Tableau 3.4 Catégories et paramètres pour la classification des concepts de l'énergie et de l'environnement (Heiselberg et al. 2006).

II.3.3 L'avantage du processus de la conception intégrée :

Le concept du « développement durable » a eu comme conséquence l'augmentation de la pression sur les concepteurs du bâtiment pour concevoir des bâtiments qui ont un plus haut niveau de performance environnementale. En dépit des interprétations différentes des experts, ils se sont mis d'accord sur le fait que le bâtiment dit « durable » doit avoir des performances hautes pendant tout son cycle de vie. Parmi ces performances, la performance énergétique vient en priorité. Les prévisions des spécialistes de l'énergie ont révélé des enjeux majeurs que les concepteurs du domaine du bâtiment doivent prendre en considération surtout la réduction de la consommation énergétique, l'intégration des technologies solaires, la minimisation du coût et le temps disponible. De ce fait, une conception efficace est exigée pour répondre à ces défis. Une conception efficace et réussie d'un bâtiment exige qu'un large éventail de facteurs et de qualités soient considérées pendant le processus de conception architecturale comme suit : ²⁶(voir fig.3.10)

- Coopération constructive entre le client, les concepteurs, les opérateurs, les utilisateurs, les entrepreneurs et les autorités réglementaires dans une atmosphère de travail d'équipe partagé.
- Considération de tous les concepts et les systèmes structuraux et techniques comme un tout pour augmenter l'efficacité de la performance.
- Considération de tous les impacts qu'un projet puisse causer à l'environnement immédiat et lointain.
- Considération des coûts du cycle de vie du bâtiment et des systèmes techniques (les coûts qui sont reliés ensemble avec la production du bâtiment, usage...etc.)
- Entretien et évacuation des déchets.
- L'implication de l'interaction du bâtiment avec l'environnement naturel et l'intégration des conditions environnementales comme le climat dans la conception du bâtiment.
- Utilisation optimale des énergies renouvelables.

L'avantage le plus important de l'approche de la conception intégrée est illustré dans la figure ci-dessous (fig.3.11). La figure indique comment l'efficacité des décisions diminue lorsque on allait des étapes initiales aux étapes tardives du cycle de vie d'un bâtiment. L'efficacité est définie comme étant le rapport entre l'impact de la décision sur la

²⁶ Löhnert, G., Dalkowski, A., Sutter, W. Integrated Design Process – A Guideline for Sustainable and Solar-optimized Building Design. Berlin/Zug, April 2003.

performance finale d'un bâtiment et le coût des actions nécessaire pour l'application de la décision. Il est à noter que les décisions prises très tôt ont le plus grand impact sur la performance et l'efficacité d'un bâtiment tandis que le coût est souvent minimal²⁷. La conception intégrée est plus efficace quand les questions clés sont abordées très tôt dans le processus de conception architecturale.

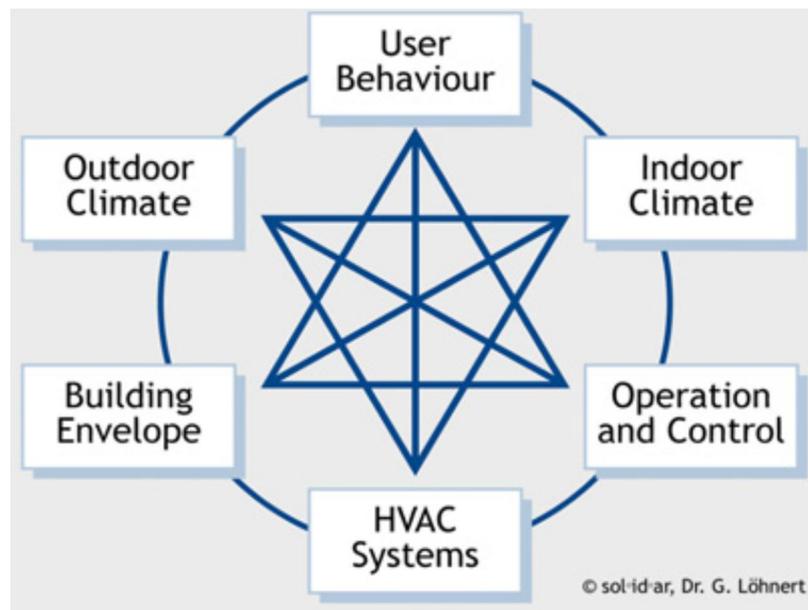


Fig.3.10 Les variables influençant la performance énergétique du bâtiment à performance élevée.

Source : Los Alamos National Laboratory Sustainable Design Guide (2002)

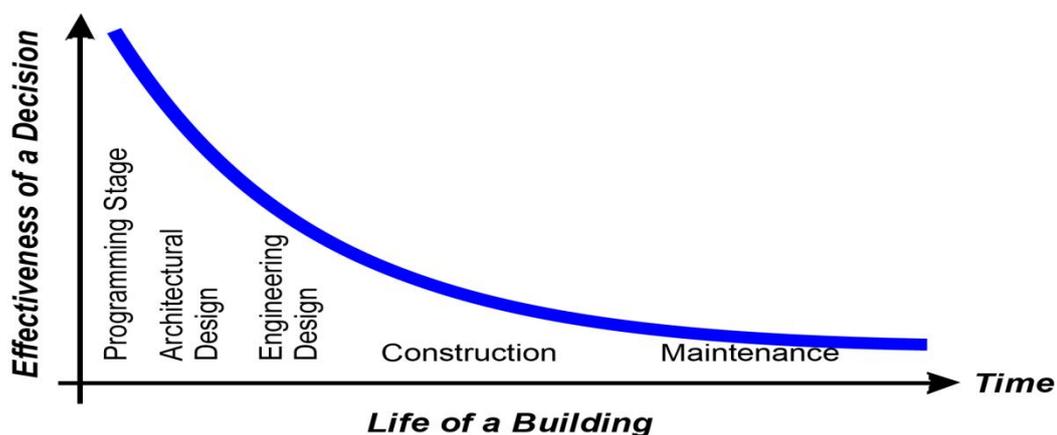


Fig.3.11. : Efficacité des décisions prises dans différentes étapes de la vie de bâtiments.

Source : Heiselberg, P (2007).

²⁷ Heiselberg, P, Integrated Building Design, DCE Lecture Notes, No. 017, Aalborg University, December 2007.

II.3.4 L'interaction des paramètres dans le processus de la conception intégrée :

La complexité du processus de la conception intégrée a comme origine les interactions entre les différents paramètres. Le tableau (3.5) est un exemple de la façon dont les paramètres agissent les uns sur les autres pendant la phase d'esquisse d'une façade.

Le tableau (2.5) indique le nombre des itérations que le concepteur doit faire quand la décision est prise concernant la conception d'une façade. Les paramètres énumérés dans le côté gauche du tableau sont ceux qui influencent la conception de la façade alors que ceux énumérés du côté droit sont ceux qui sont influencés par la conception de la façade.

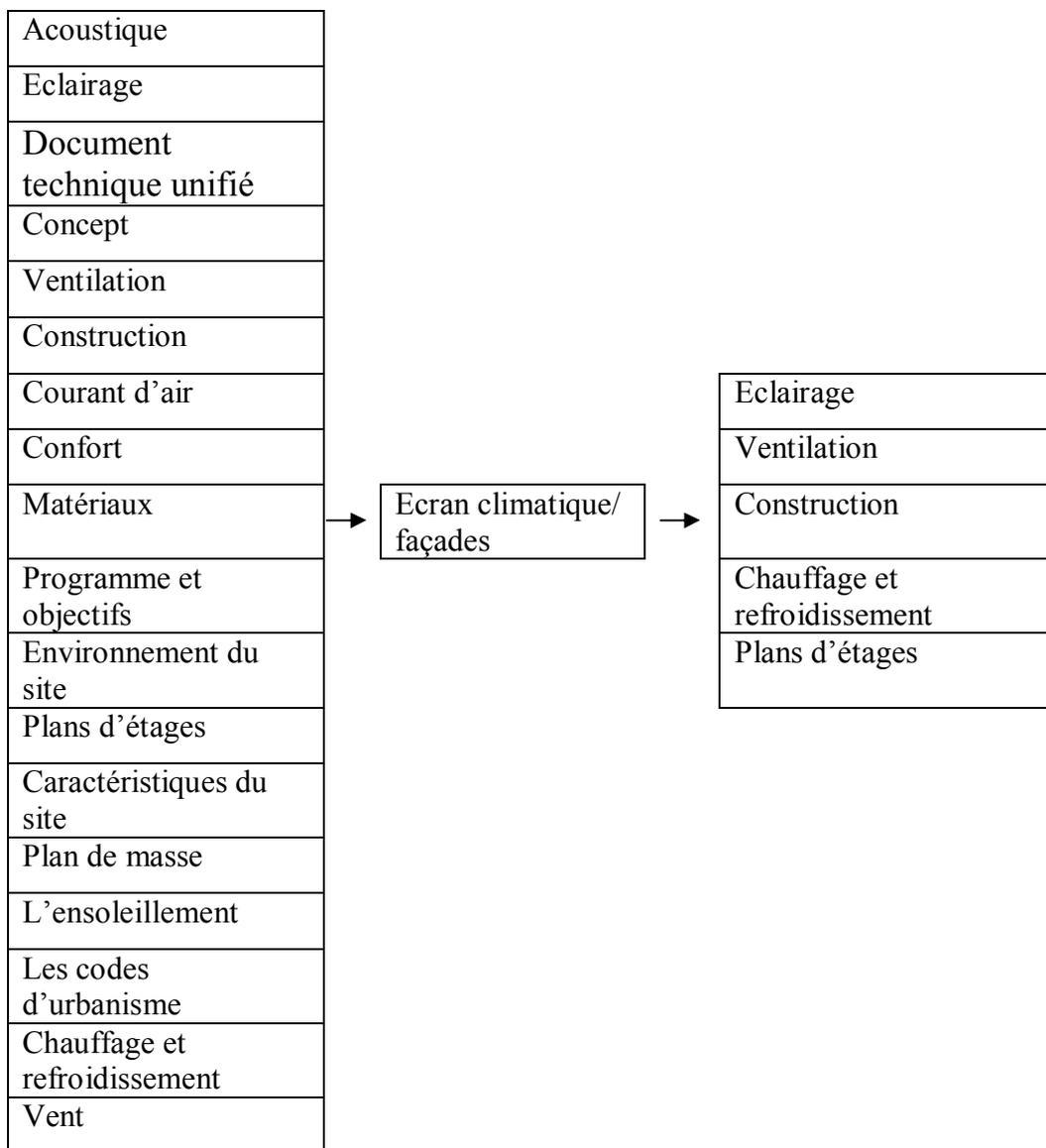


Tableau 3.5 Exemple des interactions entre les paramètres dans le processus de la conception intégrée dans la phase d'esquisse d'une façade. Source : Hansen, H et Knudstrup (2005)

II.3.5 L'équipe du projet dans le processus de la conception intégrée :

La conception architecturale a été vue comme un acte créatif individuel depuis belle lurette et c'est certainement le cas dans la phase de l'esquisse, là où l'architecte est celui qui s'occupe de la vision globale du bâtiment. D'ailleurs, l'idée qu'un seul concepteur doive être dans la commande à tous les niveaux de la production de la forme architecturale a été vue comme un idéal professionnel²⁸. Cependant, dans nos jours, dans le processus de la conception intégrée, l'architecte n'est plus la seule personne qui prend des décisions, bien qu'il maintienne sa fonction directrice comme le chef de l'orchestre et coordonne les travaux de différents membres de l'équipe de conception. Dans le processus de la conception intégrée le client joue un rôle plus actif et les ingénieurs en génie civil, en électricité ...etc. ainsi que les spécialistes de l'énergie jouent un rôle primordial dans les étapes préliminaires de la conception. Voir fig.3.12.

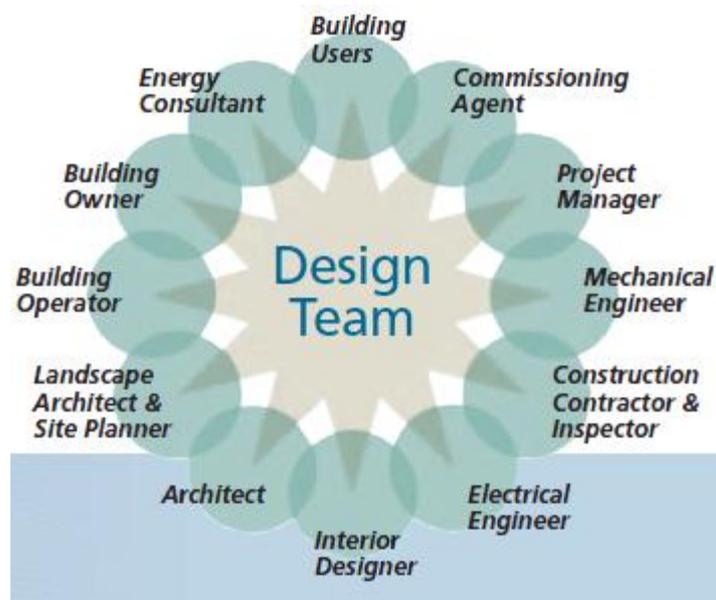


Fig.3.12 l'équipe de la conception intégrée. Source : Los Alamos National Laboratory Sustainable Design Guide (2002)

II.3.6 Modèle de développement du processus de conception :

II.3.6.1 Les éléments structurants de la conception intégrée : (voir fig.2.13)

Pendant le processus de la conception, les aspects individuels peuvent déclencher des problèmes. C'est pour cette raison que des préalables structuraux et contextuels doivent

²⁸ Zeiler. W et al., "Integral design to enhance climate equipment performance: Flexergy", Proceedings of the Eighth International Conference for Enhanced Building Operations, Berlin, Germany, October 20-22, 2008

être définis afin de guider les architectes et les ingénieurs à travers la complexité de la conception comme suit :

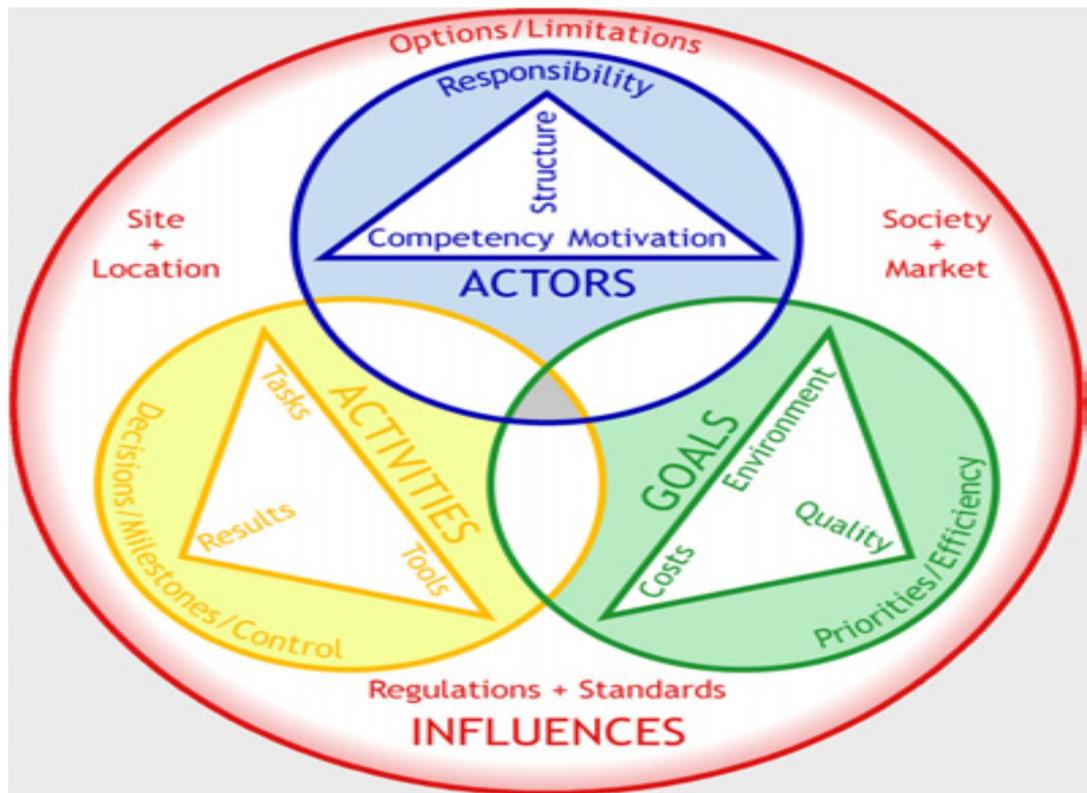


Fig.3.13 la superposition des éléments structuraux reflète leur interdépendance et leurs corrélations.
Source : Löhnert, G., Dalkowski, A., Sutter, W. (2003)

Les acteurs :

Chaque projet architectural est caractérisé par son caractère unique dû aux contraintes variées et la multidisciplinarité des membres de l'équipe de la conception. Les qualités d'un projet architectural reflètent directement la responsabilité collective et individuelle des acteurs impliqués.

Les buts :

La conception architecturale intégrée n'a pas pour objectif seulement la réduction des impacts du projet sur l'environnement et la minimisation de la demande énergétique pendant la construction et l'usage mais elle met l'accent également sur le confort de l'utilisateur en termes de lumière, aération, son et performance thermique ainsi que la qualité des matériaux de construction. Le fonctionnement, la multifonctionnalité et la flexibilité constituent également la base de ces buts pour une vie longue et utile du bâtiment.

Les activités :

Les activités comprennent la description de la façon dont se déroulent les opérations et les étapes importantes de la conception. Elles incluent également les points cruciales (interfaces) qui indiquent où et quand les décisions irréversibles devraient être prises.

Les influences :

Chaque projet architectural est soumis aux influences qui peuvent avoir des impacts sur la réalisation des buts de la conception et la qualité des résultats. Le site, la société, les règlements urbanistiques...etc. sont des exemples de ces influences.

II.3.6.2 Le processus de la conception intégrée :

- **De la linéarité à l'itération :**

Le processus de la conception traditionnel suit un chemin linéaire composé des étapes importantes. Cette séquence linéaire est nécessaire pour l'organisation de la prise de décision collective et la division des tâches entre les membres de l'équipe de conception. Contrairement à cette linéarité du processus traditionnel, le processus de la conception intégrée se caractérise par une séquence linéaire marquée par des boucles d'itération. Ces dernières permettent d'explorer attentivement l'espace du problème ce qui aide à la recherche de la solution optimale parmi tant de solutions alternatives. Voir fig.3.14.

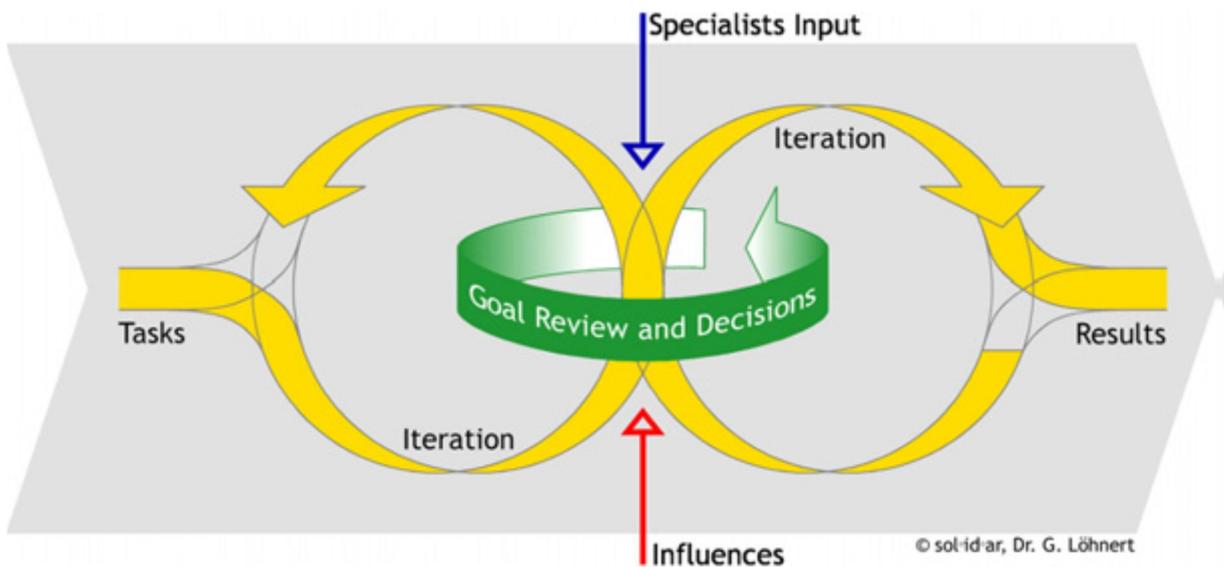


Fig.3.14 Les boucles d'itération pendant le processus de conception. Source: Heiselberg. P (2007).

- **De l'itération à l'intégration :**

Les itérations sont des éléments d'optimisation de la conception intégrée. Elles doivent avoir lieu pendant les diverses phases de conception. Les concepteurs doivent être soucieux des interfaces entre les boucles d'itération qui sont caractérisées par des résultats et des conclusions partielles. Ces transitions qui agissent comme des interfaces entre deux phases de conception doivent être organisées par une gestion qualifiée du projet pour éviter toute perte d'information. Voir fig.3.15.

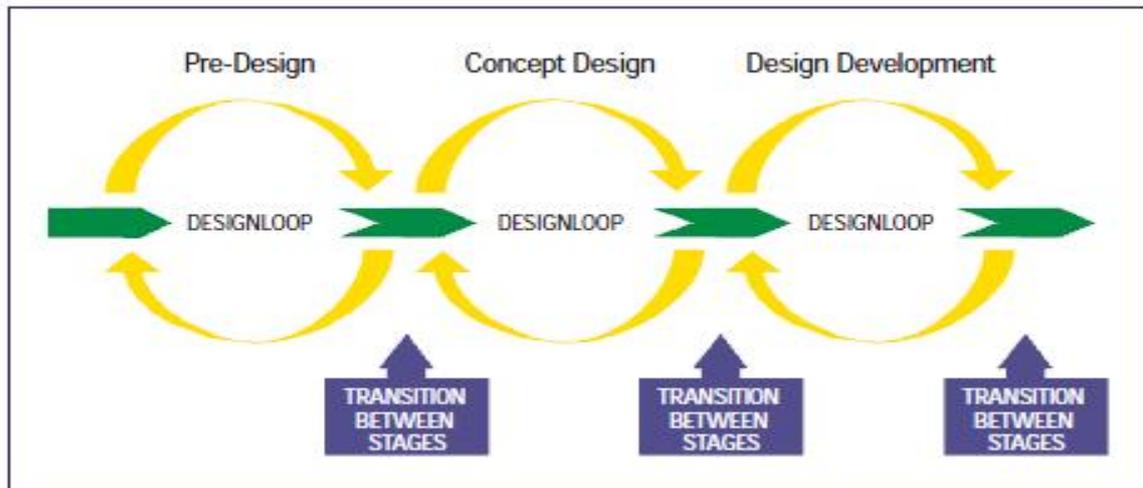


Fig.2.15 L'intégration dans le processus de conception. Source: Larsson, N. and Poel, B. (2003).

II.4 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré aux méthodes systémiques ainsi qu'à celles de la conception intégrée qui tentent d'intégrer le savoir climatique dans le processus de conception dans sa totalité. Après avoir analysé ces méthodes, on est arrivé à la conclusion que les phases premières de conception sont les plus importantes pour intégrer le savoir climatique et chaque décision de l'architecte pendant ces phases aura des répercussions soient négatives ou positives sur le comportement du bâtiment (énergétique, thermique, lumineux...etc.). Il est à noter également que les méthodes systémiques analysées revêtent un caractère simpliste et linéaire et ne reflètent pas le caractère holistique et cyclique de la conception architecturale. Ainsi, Ces méthodes négligent les autres variables de la conception à savoir les variables fonctionnelles, esthétiques, sociologiques, économiques religieuses...etc. au profit de quelques variables climatiques. C'est pour ça qu'il faut prendre tous les paramètres interagissant et, pour ce faire, seule une approche synthétique et holistique conduira à un résultant satisfaisant. L'architecte doit donc traiter simultanément tous les

problèmes et les variables impliquées dans le projet architectural sans chercher à optimiser individuellement chacun des paramètres, mais plutôt, chercher un optimum global.

Au contraire des méthodes systémiques, l'approche récente de la conception intégrée présente un caractère holistique, multidisciplinaire, cyclique et flexible, ce qui permet l'intégration des outils d'aide à la décision voir les approches multicritères. Ces dernières conduisent et guident l'architecte lors du processus de conception. Elles prennent le caractère holistique de la conception architecturale. Ces approches seront abordées dans le prochain chapitre 4.

Chapitre quatre

Approches multicritères

IV.1.Introduction :

Nous sommes confrontés à une variété de tâches de prise de décision dans notre vie quotidienne. Nous traitons beaucoup d'informations et de données dans nos activités quotidiennes, et nous, consciemment ou inconsciemment, prendrons des décisions sur la base des informations reçues et des données tant que telles. Cependant, prendre une bonne décision est une tâche difficile parce que les conflits et les compromis se produisent souvent à cause de multiples objectifs et buts qui doivent être satisfaites simultanément par le décideur.

Selon Dickson (2004), le processus de conception architecturale lui-même est considéré comme une série de décisions qui conduit progressivement vers une réalité construite¹. Ce processus de prise de décision dans la conception architecturale est un processus complexe dans sa nature parce qu'il traite beaucoup de facteurs qualitatifs et subjectifs. L'arrivée à une solution de conception optimale peut être faite par des méthodes d'optimisation appliquées dans la phase de prise de décision (Jones, 1980)².

Dans le présent chapitre nous abordons tout d'abord d'une manière détaillée la philosophie des approches multicritères qui nous permettra de comprendre leurs caractéristiques puis nous exposeront un état de l'art des différentes approches multicritères ainsi que les différentes échelles de mesures, les techniques de pondération et de normalisation.

IV.2.La philosophie de la prise de décision multicritère :

IV.2.1. Définition de la prise de décision multicritère :

La prise de décision multicritère recouvre toutes les formes des approches et des méthodes multicritères. Ces approches structurées ont pour objectif la détermination des préférences parmi les choix, les alternatives ou les options qui répondent au mieux à plusieurs objectifs. De nombreux termes, comme l'aide à la décision multicritère, analyse

¹ Harruttugil, Te et al, "conceptual framework for potential implementations of multi-criteria decision making (MCDM) methods for design quality assessment", Management and Innovation for a Sustainable Built Environment ISBN, 23 June 2011, Amsterdam, The Netherlands.

² Eilnaz A.T et al, "Multi-criteria Design Evaluation and Optimization of School Buildings Using Artificial Intelligent Approaches", Construction Research Congress, 2012.

multicritère, l'évaluation multicritère, MCDM « multicriteria decision making », MCDMA « multicriteria decision making analysis » sont trouvés dans la littérature. Ils sont définis au sein de leurs groupes respectifs de partisans, mais il n'y a pas vraiment de différenciation claire entre eux. Ce que ces approches ont en commun c'est le fait qu'elles essaient d'examiner simultanément plusieurs critères conflictuels (Janssen et Munda 1999) et elles sont plus réalistes que les approches monocritères (Roy et Vincke, 1981)³. On présente ci-dessous quelques définitions trouvées de la prise de décision multicritère :

L'analyse de la décision multicritère n'est pas un outil qui offre la solution à un problème de décision car aucune solution n'existe. Mais, plutôt, elle est une aide à la prise de décision qui permet aux décideurs d'organiser l'information disponible, d'explorer leurs propres souhaits et de minimiser la possibilité d'une déception après la décision (Belton et Stewart, 2002)⁴.

La prise de décision multicritère est définie comme étant l'évaluation des alternatives pour des fins de sélection ou de classement, en employant un certain nombre de critères qualitatifs et/ou quantitatifs qui ont différentes unités de mesure⁵.

L'une des définitions phares est celle donnée par (Roy et al, 1993)⁶ :

"L'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service à partir desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part".

IV.2.2. Histoire des approches multicritères :

l'histoire de la prise de décision multicritère remonte au 18^{ème} siècle quand Le Marquis de Condorcet a publié pour la première fois son livre intitulé « *la prise de décision par la pluralité de voix* » avec l'apparition des origines des systèmes de vote « voting systems » qui étaient souvent attribués à Le Chevalier Jean-Charles De Borda (1733-1799). Cependant, Ramon Llull (1232-1316) a introduit le concept de la comparaison par paires

³ Omann ,I, Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität,2004.

⁴ Danae. D et Stelios. G, Multi-criteria Analysis, Final Report, 2004.

⁵ Özcan. T et al, "Comparative Analysis Of Multi-Criteria Decision Making Methodologies And Implementation Of A Warehouse Location Selection Problem". Expert Systems with applications, 2011.P.2-22, 2011.

⁶ Diaby. M et al, « Utilisation d'une méthode multicritère d'aide à la décision pour le choix des clones d'hévéa à planter en Afrique », Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2010, **14** (2), 299-309.

avant Condorcet, tandis que Nicolaus Cusanus (1401-1464) a introduit « la méthode de pondération » environ trois siècles et demi avant Borda. Ainsi, il est à noter également qu'une lettre de Pline Le jeune (~ AD 105) à Titus Aristo prouve qu'il a introduit la stratégie de vote d'approbation ternaire « *the ternary approval voting strategy* » et qu'il s'est intéressé aux systèmes de vote long temps avant Ramon Llull et Nicolaus Cusanus. Il y a quelques similitudes entre « *La méthode de pondération* » de Borda et les théories récentes d'utilité de valeur et entre la méthode de Condorcet et les méthodes actuelles de surclassement.

Pareto (1896) a fondé pour la première fois une base pour aborder les décisions concernant les problèmes en présence de critères multiples. Un des résultats les plus importants de la recherche de Pareto était l'introduction du concept d'efficacité. Koopmans (1951) a élargi le concept de l'efficacité de Pareto par l'introduction du concept de l'ensemble efficace qu'il a défini comme étant un ensemble de solutions alternatives non-dominées⁷. Pendant les années 1940 et 1950, Von Neumann et Morgenstern (1944) ont introduit la théorie de l'utilité, l'une des bases méthodologiques principales des méthodes multicritères modernes de la prise de décision et la science de décision en général.

Un changement important au sujet de l'analyse multicritères a été introduit par Simon, qui a développé la théorie de la « rationalité limitée ». Simon stipule qu'un décideur choisit une solution satisfaisante “satisficing” plutôt qu'une solution optimale et que la rationalité n'est pas indépendante du processus de la décision, mais doit être trouvée dans le processus lui-même (Simon 1976). Ce point peut être vu comme le début des approches d'aide à la décision⁸.

Dans les années 60, l'analyse multicritère a commencé à avoir son propre vocabulaire. Charnes et Cooper (1961) ont élargi la théorie traditionnelle de la programmation mathématique par la proposition de la programmation par buts « goal programming ». Fishburn (1965) a étudié l'extension de la théorie de l'utilité en présence de critères multiples. Il est à noter que toutes ces études reviennent à des chercheurs travaillant aux Etats-Unis. Vers la fin des années 60, la prise de décision multicritère a attiré l'attention des chercheurs européens. Roy (1968), l'un des pionniers de ce domaine, a introduit les

⁷ Michael. D et Constantin. Z, Multi-criteria Decision Aid Classification Methods, Kluwer Academic Publishers, USA, 2004.

⁸ Omann ,I, Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität,2004.

méthodes de surclassement. Il est considéré le fondateur de l'école « européenne » de la prise de décision multicritère⁹.

En 1972, le premier congrès sur les approches multicritères a eu lieu en Caroline du Sud aux Etats Unis. Le premier ouvrage complet des approches multicritères a été présenté en 1976 par Keeney et Raiffa dont le contenu est encore utile jusqu'à aujourd'hui. Ils ont basé leur étude sur la théorie de la décision, qui pour la plupart est associée aux arbres de décision, la modélisation de l'incertitude et la règle d'utilité prévue. En élargissant la théorie de la décision pour s'adapter aux conséquences multi-attribues, Keeney et Raiffa ont proposé une intégration théorique de l'incertitude liée aux conséquences futures et les objectifs multiples. Ils ont agrandi l'ensemble des axiomes de telle sorte que les décisions dont les objectifs sont multiples peuvent être analysées¹⁰.

Dans les années 80, des méthodes interactives d'ordinateur ont été proposées. Elles ont facilité considérablement la communication entre les décideurs. En 1985, les méthodes multicritères avaient acquis de la réputation mondiale.

Pendant les années 90, les méthodes de l'analyse multicritère ont évolué théoriquement et pratiquement en profitant des recherches avancées dans le domaine de la technologie de l'information et l'intelligence artificielle.

Les approches multicritères sont développées fondamentalement dans deux écoles, l'école européenne et l'école américaine. La première se diffère de la dernière du fait qu'elle cherche à donner des recommandations alors que l'école américaine essaye d'approcher une solution idéale dérivée d'un ensemble d'axiomes¹¹. L'école européenne étudie les méthodes discrètes et les relations de surclassement tandis que l'école américaine s'intéresse aux méthodes de l'utilité additive.

IV.2.3. Objectifs et caractéristique des approches multicritères:

Selon San Jose et de Cuadrado (2010), la prise de décision multicritère est une technique utile pour réunir toute les informations complexes dans la conception et la construction de bâtiment. Les approches multicritères, durant ces dernières années, sont devenues l'une des méthodologies les plus puissantes dans l'analyse d'optimisation (Papadopoulos et

⁹ Michael. D et Constantin. Z, Multi-criteria Decision Aid Classification Methods, Kluwer Academic Publishers, USA, 2004.

¹⁰ Department for Communities and Local Government, Multi-criteria analysis: a manual, London, 2009.

¹¹ Roy. B. and Vanderpotten. D, The European School of MCDA: Emergence, Basic Features and Current Works. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis 5, 22-38, 1996.

Karagiannidis, 2008)¹². Elles servent à augmenter la qualité de la prise de décision en fournissant une plate-forme méthodologique complète. Ce sont des méthodes prennent en considération plusieurs critères sans les réduire à un seul. Pour cela, nous nous sommes intéressés aux méthodes multicritères.

L'objectif général des approches multicritères est d'aider le décideur dans le choix de la meilleure alternative à partir d'un certain nombre d'alternatives faisables et réalisables en présence de critères et de choix multiples ainsi que des priorités¹³, autrement dit, chercher une solution acceptable et réaliste en tenant compte l'environnement dans lequel elles se situent. Donc, elles pourraient réduire la complexité et aider les acteurs du projet architectural à comprendre leurs préférences et établir un dialogue ouvert, explicite et transparent entre eux. De ce fait, le décideur reste attaché au contrôle de l'environnement de la décision plutôt qu'à la méthodologie.

Le rôle des approches multicritères n'est pas la découverte de la solution, mais la construction et la création de quelque chose qui aide l'acteur à participer dans le processus décisionnel que ce soit au niveau de la modélisation et la transformation de ses préférences ou pour prendre une décision conformément à ses objectifs (Roy ; 1990)¹⁴. Il est à noter que dans les approches multicritères il n'est plus question de chercher une solution optimale mais il s'agit alors de construire ou de calculer une solution satisfaisante de consensus. C'est ce que Simon appelle le principe de la rationalité limitée. Pour lui, les décideurs, au lieu de chercher la solution optimale (la meilleure), ils se contentent d'une solution satisfaisante. Le concept de la solution optimale ne tient pas parce qu'il n'y a aucune alternative qui domine les autres en ce qui concerne tous les critères. Cela est dû à la nature des problèmes dans les systèmes complexes qui sont souvent multidimensionnels et dynamiques¹⁵.

L'analyse multicritères est fondée sur 4 considérations (Schärlig, 1999)¹⁶:

- 1- Plusieurs critères sont pris en considération,
- 2- Ces critères sont en général conflictuels,

¹² Akadiri. P, Development of multi-criteria approach for the selection of sustainable materials for building projects, thèse de doctorat, University of Wolverhampton, February 2011.

¹³ Walter W. K, A Spatial Multi-criteria Decision Analysis Approach for Evaluating Sustainable Development, Master of Art, the College of Arts and Sciences of Ohio University, USA, 2010.

¹⁴ Moeffaert D. V, Multi Criteria Decision Aid in Sustainable Urban Water Management, Thèse de doctorat, Stockholm 2002.

¹⁵ Omann ,I, Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität, 2004.

¹⁶ Fernandez. L, Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs relatifs au choix des matériaux, Thèse de doctorat, Université de Toulouse. 2010.

- 3- Elle tente à réaliser des arbitrages et/ou compromis et non pas à atteindre un optimum,
- 4- Ces arbitrages et/ou compromis donnent aux critères différentes valeurs afin d'atteindre une solution réaliste et acceptable (équilibre).

Les caractéristiques générales des approches multicritères¹⁷ :

- les problèmes de la décision multicritère sont mathématiquement mal définis.
- la variété des échelles exigées pour mesurer les critères. Les informations contenues dans les critères et celles qui concernent les effets de la décision peuvent être incertaines et fortement qualitatives¹⁸. Quelques critères peuvent être transformés en indicateurs quantitatifs, d'autres emploient des paramètres qualitatifs. Les paramètres qualitatifs peuvent être employés directement en tant que variables linguistiques ou peuvent être transformés en variables cardinales et ensuite employées en tant que variables quantitatives.
- Les approches multicritères ne sont pas des systèmes axiomatiques purs, mais leurs modèles ont une base mathématique et dépendent de différents axiomes. Elles sont également factuelles, autrement dit, elles sont basées sur des hypothèses réalistes¹⁹. Elles emploient également des modèles mathématiques qui contiennent des hypothèses restrictives, mais pas dans un sens exclusif. Ces modèles ne sont pas employés pour remplacer les décideurs, mais plutôt pour aider à l'identification de la solution²⁰.

IV.2.4. Les avantages des approches multicritères :

Les approches multicritères offrent plusieurs autres avantages :

- Le processus de décision est structuré. Cela favorise la pensée systématique, la définition des alternatives, l'identification des critères et l'évaluation des incidences des décisions.
- Elles offrent une réflexion plus explicite sur les jugements de valeur concernant les alternatives, les critères et les compromis. Elles permettent aux décideurs de se

¹⁷ Omann ,I, Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität,2004.

¹⁸ Munda. G, Multicriteria Evaluation in a Fuzzy Environment. Heidelberg: Physica Verlag, 1995.

¹⁹ Ibid

²⁰ Roy. B and Vincke. P. "Multicriteria Analysis: Survey and New Directions". European Journal of Operational Research **8**, 207-218, 1981.

concentrer sur plus de deux ou trois critères. Cette tâche est difficile pour le cerveau humain sans soutien.

- Elles fournissent un cadre pour l'exploration des objectifs, les intérêts et les soucis des acteurs. Différentes positions de différents acteurs sont considérées et identifiées dans les phases initiales du processus.
- L'information idéale est précise, sûre, approfondie et claire (Froger et Munda 1998)²¹ et tant que ce cas idéal ne se produit que très rarement en réalité, les approches multicritères sont capables de traiter les données imprécises et incertaines. Les approches multicritères évaluent d'une manière rationnelle le risque et l'incertitude qui caractérisent les données ou les impacts des décisions
- Les négociations parmi les acteurs sont facilitées.
- Le processus décisionnel favorise la transparence entre les acteurs²². La subjectivité, qui est présente dans n'importe quelle évaluation, est rendue explicite²³.
- L'intégration des parties prenantes « stakeholders » est soutenue et encouragée. Les différentes approches mettent l'accent sur cette intégration comme l'approche de l'évaluation participative multicritères.
- Des préférences mal établies des décideurs peuvent être considérées.
- Des données fondées sur des considérations subjectives peuvent être employées.
- L'ensemble des critères peut être très hétérogène.

IV.2.5 Les lacunes des approches multicritères :

Chaque approche a ses faiblesses et ses forces. Certaines des faiblesses des approches multicritères sont énumérées ci-dessous :

- Il pourrait y avoir trop d'information pour les acteurs, ce qui réduit leur motivation pour participer.
- Il est difficile de vérifier ou répéter les résultats d'une méthode multicritère car ils dépendent en grande partie du processus spécifique et les interactions entre les

²¹ Omann, J., Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität, 2004.

²² De Montis, A. et al., "Criteria for quality assessment of MCDA-methods". 3rd Biennial Conference of the European Society for Ecological Economics. Vienna, 3-6 May. 2000.

²³ Munda, G et al. "Environmental Decision Making: A Comparison Between Cost-Benefit Analysis and Multicriteria Decision Aid". In S. Faucheux, M. O'Connor and J. van der Straaten (Eds.), *Sustainable Development: Concepts, Rationalities and Strategies*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 227-238, 1998.

acteurs. Les résultats ne sont jamais exactement les mêmes dans les différentes occasions.

- En général tous les types des problèmes liés à la participation peuvent se produire.
- Il y a le risque de l'application fautive ou inexacte de la méthode ou de l'approche.
- Tant qu'il est évident que les techniques multicritères ne puissent pas résoudre tous les conflits concernant des problèmes de décision dans des situations complexes, elles peuvent, cependant, nous aider à gagner la perspicacité en fournissant des informations systématiques au sujet des conflits et des compromis impliqués²⁴.
- Il y a tant de techniques, d'approches et de méthodes à choisir ce qui augmente la confusion.
- Différentes techniques multicritères peuvent être incorrectement appliqués à un problème particulier des résultats différents.
- Le problème de l'incertitude des résultats mérite une attention spécifique. Cela peut exiger l'application de plusieurs techniques multicritères à un problème particulier pour examiner les résultats (van Pelt, 1994)²⁵.

IV.2.6 Les problématiques des approches multicritères :

Selon la catégorie du problème pour laquelle l'évaluation multicritères est employée, Roy Bernard (1989) a proposé quatre problématiques comme suit²⁶ :

- Identifier la meilleure alternative ou sélectionner un nombre limité de meilleures alternatives (problème de choix). D'un point de vue mathématique, la problématique du choix consiste à poser le problème en terme de recherche d'un sous-ensemble propre des actions de A, de cardinal aussi faible que possible et contenant la ou les meilleures actions. C'est par exemple le cas de la problématique de l'optimisation qui consiste à rechercher les actions qui maximisent une fonction objective. (voir fig.4.1)
- Classer les alternatives selon des groupes homogènes prédéfinis (problème de sélection ou tri). La problématique du tri consiste alors à rechercher un protocole

²⁴ Omann ,I, Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität,2004.

²⁵ Ibid.

²⁶ Ginting. R, intégration du système d'aide à la décision multicritères et du système d'intelligence économique dans l'ère concurrentielle, Thèse de Doctorat, l'Université de droit et des sciences d'Aix-Marseille, 2000.

d'affectation, permettant de distribuer les actions de A sur l'ensemble des catégories prédéfinis. (voir fig.4.2)

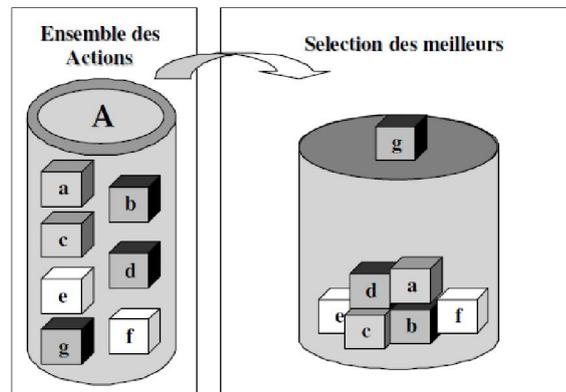


Fig.4.1 Problématique de choix. Source : Ginting, R (2000)

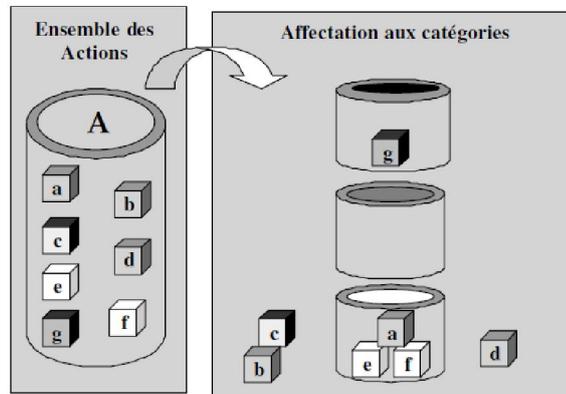


Fig.4.2 Problématique de tri. Source : Ginting, R (2000)

- Construire un « ranking » d'alternatives en allant des meilleures vers les moins bonnes (problème de rangement). D'un point de vue mathématiques, la problématique du rangement consiste à poser le problème en terme de recherche d'une relation binaire transitive, définie sur A (ou sur une partie de A), relation reflétant aussi fidèlement que possible les préférences exprimées ou, plus simplement, susceptible d'entraîner une conviction dans le cadre des hypothèses de travail acceptées. (voir fig.4.3)
- Identifier les aspects principaux des alternatives et les décrire selon ces aspects (problème de description). Il s'agit de poser le problème en termes limités à une description des actions de l'ensemble A et /ou de leurs conséquences, c'est-à-dire à orienter l'investigation vers la mise en évidence d'informations relatives aux actions potentielles conçues en vue d'aider directement le décideur à les découvrir, à les

comprendre, à les jauger et ce compte tenu du caractère révisable et /ou transitoire de A.

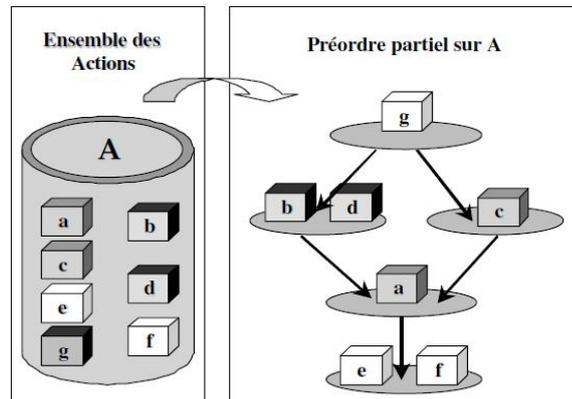


Fig.4.3 Problématique de rangement. Source : Ginting. R (2000)

Si la décision est prise parmi plusieurs alternatives du projet, il est prudent de considérer le problème de décision selon le type « rangement ». Ceci garantit que le résultat du processus décisionnel retiendra plus d'informations qu'un processus de choix, qui élimine toutes les autres alternatives. Donc, un problème de rangement peut être considéré comme une évolution du problème de choix, dont la direction favorable est une exploitation des informations avec plus de nuances (Maystre et al, 1994)²⁷.

IV.2.7 Les étapes du processus :

IV.2.7.1 Génération des alternatives (solutions ou options) :

Il s'agit dans cette étape la définition de l'ensemble des actions potentielles dans la procédure de la décision. La définition de l'ensemble des options est loin d'être une étape facile et peu de recherches ont été consacrées à cette étape. Zionts (1983) a stipulé que le processus de la détermination des alternatives peut exiger beaucoup d'effort plus que celui du choix d'une alternative²⁸. Si les alternatives sont produites sans prudence, beaucoup de temps serait perdu dans leur évaluation par les décideurs sans atteindre l'objectif. La génération des alternatives est un exercice de créativité et d'expérience. De ce fait, il est difficile de spécifier une méthode formelle pour leur génération. Cependant, il y a un certain nombre de techniques qui ont été proposées comme aide à la génération des

²⁷ Eduardo Breviglieri Pereira de Castro, *Méthodes d'aide à la conception architecturale basée sur l'analyse multicritère et sur les données simulées des comportements des bâtiments*, Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon et l'université fédérale de Rio de Janeiro, 2005.

²⁸ Hyde K. M, *Uncertainty analysis methods for multicriteria decision analysis*, Thèse de doctorat, Adelaide University, May 2006.

alternatives. Ces techniques ont été décrites par Kirk et Spreckelmeyer (1993) et Kumlin (1995)²⁹ :

- Brainstorming
- Delphi
- Les techniques de manipulation :
 - The Gordon Technique
 - Synectics
 - Bionics and biomechanics
- Pattern :
 - Checklists
 - Morphological analysis
 - Attribute listing
 - Pattern language

Dans ce travail les alternatives sont l'ensemble des solutions ou alternatives possibles, désirées et imaginées par l'auteur du projet. Dans la réalité, la plupart du temps, le nombre des solutions architecturales (alternatives) est restreint à cause des facteurs comme les lois d'urbanisme, le cout du projet, la typologie du terrain, les références culturelles...etc.

IV.2.7.2 Identification des objectifs et des critères :

La définition des critères est une étape importante du processus décisionnel. Les critères sont conçus pour comparer et évaluer chacune des alternatives et doivent donc rapporter l'objectif global de la tâche de la prise de décision. Les critères sont les composantes essentielles du processus de la prise de décision parce qu'ils forment la base de l'évaluation des alternatives considérées. Différents types de critères peuvent être définis :

a- Les vrais critères :

On appelle vrai critère tout critère dont la structure de référence sous-jacente est une structure de pré ordre total. Aussi, dans le cas d'un vrai critère, on a, pour deux actions (a, b) de A : $a \text{ P}g b \Leftrightarrow g(a) > g(b)$ et $a \text{ I}g b \Leftrightarrow g(a) = g(b)$,

Où **Pg** signifie « strictement préféré que » et **Ig** signifie « indifférent à » en considérant les effets sur le critère **g**. Deux actions sont dites indifférentes selon le critère **g** si leurs évaluations respectives sur le critère **c** sont égales. Dans le cas contraire, l'une des deux actions comparées est strictement référée à l'autre. En effet, toute différence positive entre

²⁹ Andresen. I, A Multi-Criteria Decision-Making Method for Solar Building Design, PhD-dissertation, the Norwegian University of Science and Technology, Norway,2000.

$g(a)$ et $g(b)$ est supposée traduire une préférence stricte en faveur de a selon le critère g . On en conclut que tout vrai critère possède un pouvoir discriminant absolu.

Cependant, en pratique, il apparaît que le modèle du vrai critère peut conduire à des situations préférentielles peu probantes. Cela provient essentiellement :

- De la part d'imprécision et d'incertitude qui entache l'évaluation des actions potentielles sur les diverses conséquences entrant dans le support d'un critère ;
- De la perte inévitable d'information qui entache l'évaluation des actions potentielles sur les diverses conséquences entrant dans le support d'un critère,
- De la difficulté à modéliser explicitement certains éléments essentiels à la comparaison de deux actions.

Pour rendre compte de ces difficultés, le décideur est amené à adjoindre aux fonctions critères des seuils de discrimination nuancant ainsi leur pouvoir discriminant.

Mais, en réalité, les petites différences peuvent être vues comme indifférence, menant à un quasi critère.

b- Les quasis critère :

$$a \text{ Pg } b \Leftrightarrow g(a) - g(b) > q ; a \text{ Ig } b \Leftrightarrow |g(a) - g(b)| \leq q,$$

Là où q est le seuil d'indifférence et montre la plus grande différence $g(a) - g(b)$ qui est compatible avec une situation d'indifférence. Dans ce cas le décideur ou le concepteur introduit un seuil d'indifférence q indiquant la valeur en dessous de laquelle toute différence entre a et $c(b)$ traduit une indifférence entre deux actions a et b . Ainsi, l'homme d'étude admet que de l'écart $g(a) - g(b)$ inférieur à q traduit également une indifférence entre a et b et que l'écart supérieur à q traduit une préférence stricte de a par rapport à b . Si on veut éviter un saut soudain de l'indifférence à une préférence stricte, il est possible de présenter la préférence faible Qg (représente l'hésitation entre l'indifférence et la préférence (Vincke, 1990), qui fonctionne comme zone-tampon et mène à la définition d'un pseudo-critère (Bouyssou, 1990)³⁰.

c- Les pseudos critères :

$$a \text{ Pg } b \Leftrightarrow g(a) - g(b) > p, a \text{ Qg } b \Leftrightarrow q < g(a) - g(b) \leq p, a \text{ Ig } b \Leftrightarrow |g(a) - g(b)| \leq q,$$

³⁰ Omann, J., Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität, 2004.

Où p est le seuil de préférence, dont au-dessus le décideur est sûr de la préférence stricte (la structure de préférence fondamentale est une structure de pseudo-ordre (Vincke 1992)³¹).

Dans le seuil d'indifférence un décideur ne perçoit aucune différence entre deux options ou alternatives. Donner une valeur aux seuils p (seuil de préférence) et q (seuil d'indifférence) n'est pas une tâche facile. Ces seuils peuvent être des nombres fixés ou des variables dépendant des critères, $q(g(a))$ ou $p(g(b))$ (une différence de 10 lux d'éclairément par exemple n'a pas le même effet quand la quantité globale est environ 100 lux ou 1000 lux). Ainsi, une zone d'hésitation entre la préférence stricte et l'indifférence est définie : c'est la zone de préférence faible. (Voir Figure.4.4).

Les méthodes d'agrégation emploient ou exigent différentes formes de critères. Des méthodes simples comme SAW emploie des critères vrais tandis que les méthodes de surclassement comme PROMETHEE, emploie des pseudo-critères. Bouyssou (1990), Georgopoulou et al (1997), et Al-Kloub et al (1997) stipulent qu'afin de faire une évaluation appropriée des alternatives potentielles, une famille consistante de critères doit être³² :

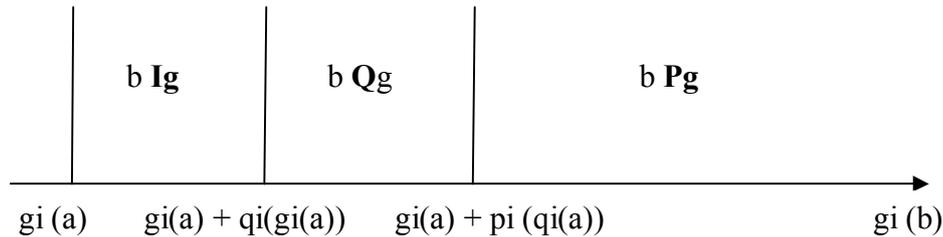


Fig.4.4 Les seuils d'indifférence et de préférence.

- Lisible (c.-à-d. contenir un nombre suffisamment petit de critères afin de constituer une base pour la discussion, en permettant l'évaluation de l'information inter-critères nécessaire pour l'exécution d'une procédure d'agrégation ;
- Opérationnelle/compréhensible/mesurable (c.-à-d. considérée par tous les décideurs comme une base solide pour la continuation de la procédure de la prise de décision) ;

³¹ Ibid

³² Hyde K. M, Uncertainty analysis methods for multicriteria decision analysis, thèse de doctorat, Adelaide University, May 2006.

- Approfondie/complète (c.-à-d. contenir chaque point de vue important)
- Monotonique (c.-à-d. les préférences partielles modelées par chaque critère doivent être compatibles aux préférences globales exprimées sur les alternatives)
- Non-redondante (c.-à-d. les critères ne devraient pas être comptés en double ;
- Minimales/essentiels (c.-à-d. les critères inutiles ne devraient pas être inclus).

Des méthodologies nombreuses pour l'organisation de l'information ont été développées et employées. Il y a aucune méthodologie « universelle » qui ne peut être appliquée à tous les types de projets. Il est également peu probable qu'une méthodologie totaliste sera développée vu la nature changeante de l'industrie du bâtiment et le caractère unique des projets de construction. Ainsi, les méthodologies pour la gestion de l'information devraient être considérées comme outils qui peuvent être utilisés comme aides dans le processus de conception.

Des outils communs pour le contrôle de l'information incluent des listes de contrôle (check-lists), les matrices, et les hiérarchies, (voir fig.4.5). Les listes de contrôle sont des listings simples des issues à considérer. Les matrices fournissent un cadre bidimensionnel pour comparer entre un ensemble d'issues et un autre ensemble d'aspects. Les hiérarchies facilitent la division d'issues reliées en différents niveaux de détail et le groupement en des entités séparées.

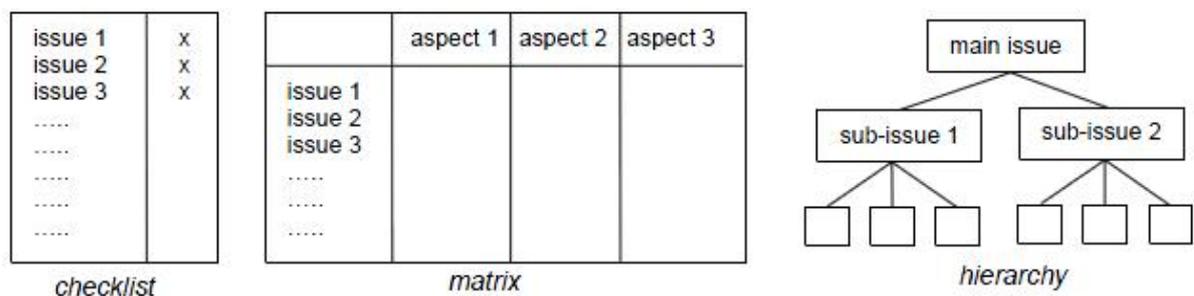


Fig.4.5 Exemples d'outils pour organiser les informations. Source : Andresen (2000)

Deux approches sont possibles afin de définir un ensemble fini de critères (Vincke, 1992) :³³

³³ Fernandez. L, Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs relatifs au choix des matériaux, Thèse de doctorat, Université de Toulouse. 2010.

- **L'approche du haut vers le bas** : construction d'une structure hiérarchique ayant à son premier niveau un objectif global éclaté en sous-objectif, eux-mêmes éclatés en sous-sous-objectifs, jusqu'à atteindre un niveau mesurable qualifié d'attribut. Cet ensemble d'attributs doit posséder certaines propriétés telles que l'exhaustivité, la non redondance, la cohérence, l'indépendance, la lisibilité, l'opérationnalité (Roy, 1985),
- **L'approche du bas vers le haut** : construction d'une structure dans laquelle il est nécessaire d'identifier en premier lieu toutes les conséquences puis remonter vers l'objectif global (fig.4.6).

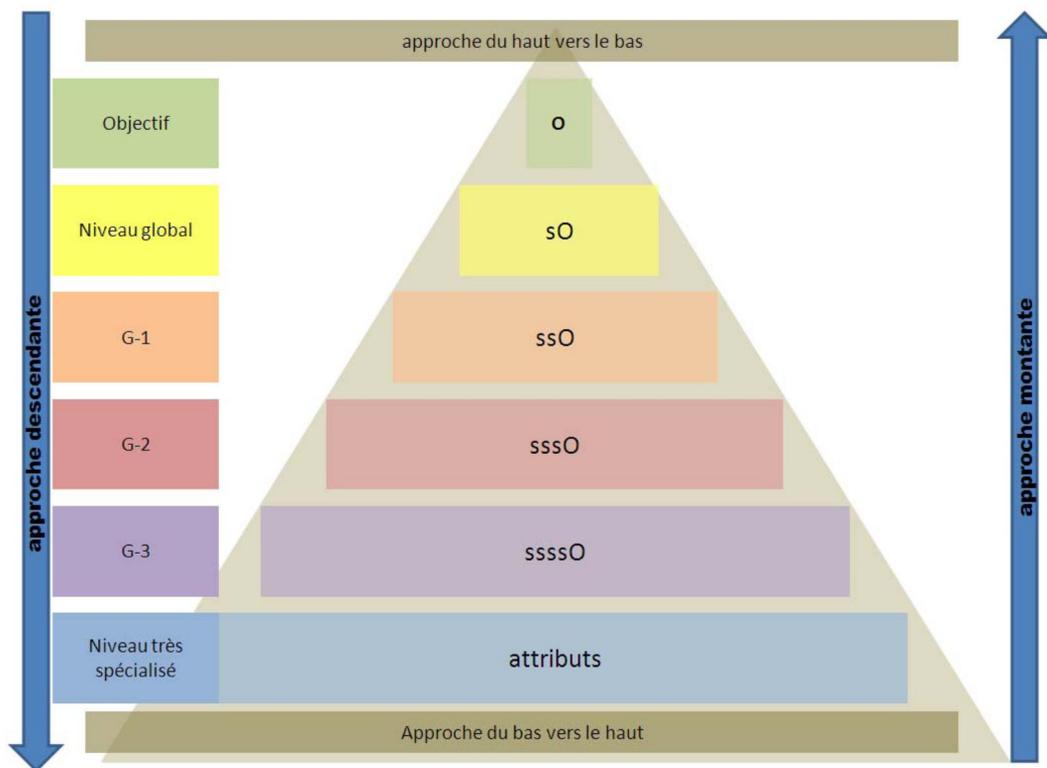


Fig.4.6 Les approches de définition de critères. Source : Fernandez (2010).

Selon jacquet-largreze et le Siskos (2001), quatre types de critères sont employés dans les approches multicritères de la prise de décision :³⁴

- Critères mesurables
- Critères ordinaux
- Critères probabiliste
- Critères flous

³⁴ Hyde K. M, *Uncertainty analysis methods for multicriteria decision analysis*, Thèse de doctorat, Adelaide University, May 2006.

Il s'agit dans cette étape le choix des critères qui doivent être considérés au long de la procédure de décision. Ces critères sont des expressions qualitatives ou quantitatives de points de vue, objectifs concernant le contexte réel, qui permettent de juger des objets ou des événements. Pour que telles expressions puissent devenir des critères, elles doivent être utiles pour le problème considéré. Les critères sont associés à une échelle de valeurs ordinales ou cardinales. Dans ce travail, on considérera cinq critères pour l'évaluation des solutions de projet : la disponibilité de lumière naturelle, le confort visuel, l'ensoleillement, la consommation énergétique et le confort thermique. Donc, ces cinq critères seront utilisés pour définir les performances individuelles de chaque solution de projet défini dans la première étape du processus de décision. Ces critères ont été choisis parce qu'ils sont parmi ceux qui peuvent être utilisés pendant la phase initiale de conception.

IV.3 Classification des méthodes multicritères :

Il y a plusieurs possibilités de classification des méthodes :

Les méthodes multicritères se divisent en deux catégories³⁵ :

- les méthodes qui résolvent les problèmes avec une série discrète de solutions.
- les méthodes de résolution des problèmes qui ont besoin de la sélection d'une série continue de solutions.

Quant à la première approche, une solution est choisie ou un classement est établi et le nombre des solutions est limité et déterminé alors que le nombre des solutions dans la deuxième approche n'est pas prédéterminé et les buts sont exprimés par des fonctions d'objectifs claires et la solution est calculée à l'aide de procédure spécifique³⁶. Les méthodes continues se déroulent en deux étapes ; la génération d'une série de solutions efficaces et l'exploration de cette série afin d'en trouver une solution satisfaisante par l'aide de procédures interactives (Munda et al. 1994b)³⁷.

Les méthodes multicritères peuvent être divisées en trois approches méthodologiques majeures selon Roy (1985)³⁸ :

- **L'approche du critère unique de synthèse, évacuant toute incomparabilité.**

³⁵ Hwang C. L. and Yoon. K, Multiple Attribute Decision Making - Methods and Application: A State of the Art Survey. Berlin, New York: Springer, 1981.

³⁶ De Montis. A. et al, "Criteria for quality assessment of MCDA-methods". 3rd Biennial Conference of the European Society for Ecological Economics. Vienna, 3-6 May. 2000.

³⁷ Omann ,I, Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität,2004.

³⁸ Michael. D et Constantin. Z, Multi-criteria Decision Aid Classification Methods, Kluwer Academic Publishers,USA,2004.

Il y a trois étapes à faire dans cette approche :

- a- La première étape est la matrice de performance.
- b- la deuxième étape englobent les procédures pour déterminer si les critères sont indépendants les uns des autres ou pas.
- c- La troisième étape comprend les manières d'estimation des paramètres par une fonction mathématique (v) pour exprimer l'évaluation globale d'une solution en terme de sa performance par rapport à chaque critère.

Cette approche est basée sur la fonction d'agrégation (v) qui représente au mieux les préférences du décideur. Cette fonction est utile pour faire des évaluations et des comparaisons entre les alternatives. Elle décrit la réponse du décideur avec une forme analytique exacte d'une fonction. Le classement des solutions est basé sur des valeurs numériques attribuées. Ceci suppose que les préférences sont complètement formées et seulement les préférences ou les indifférences strictes existent³⁹. Dans l'environnement complexe de la prise de décision il pourrait être possible que deux solutions soient simplement incomparables. Cette méthode n'exclut pas le fait qu'il y a peut être une bonne raison de justifier l'incomparabilité entre deux solutions. De telles méthodes supposent qu'une fonction d'utilité, ou de valeur, existe et qui représente les préférences du décideur. Le décideur doit évaluer cette fonction. Cette fonction peut être additive, multiplicative ou distributionnelle...etc.⁴⁰

- **l'approche du surclassement de synthèse :**

Les fondations de la théorie de la relation de surclassement « Outranking relation theory, ORT » ont été introduites par Bernard Roy à la fin des années 1960. Depuis lors, cette théorie a été employée par les chercheurs qui travaillent sur les approches multicritères, principalement en Europe.

Toutes les techniques de la théorie de surclassement fonctionnent par deux étapes importantes. La première phase implique le développement d'une relation de surclassement tandis que la seconde étape implique l'exploitation de la relation de surclassement afin de faire l'évaluation des solutions pour des objectifs de choix, de classement ou de classification/tri.

Selon Schärli Alain (1985), les méthodes de surclassement se caractérisent par une attitude d'agrégation partielle. Nous rappelons la notion d'une relation de surclassement :

³⁹ Roy. B, "Decision-Aid and Decision-Making", *European Journal of Operational Research* 45, 1990, 324-331.

⁴⁰ Tsoukias. A, *From Decision Theory to Decision Aiding Methodology*. DIMACS Rutgers University. Technical Report, 2003.

« Une relation de surclassement est une relation binaire S définie dans A telle que aSb si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur et étant donné la qualité des évaluations des actions et la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bon que b , sans qu'il y ait de raison importante de refuser cette affirmation »⁴¹.

- **Les méthodes interactives :**

Tandis que les deux premières approches incarnent une structure mathématique claire, la troisième n'est liée à aucun procédé formalisé ou automatique mais emploie un dialogue entre le décideur et l'analyste. La structure de préférence du décideur est évaluée localement et progressivement en posant des questions et ensuite en indiquant des choix simples faits par les décideurs. L'objectif majeur de ces méthodes est de lancer et soutenir les processus d'apprentissage individuels et collectifs⁴². La procédure serait terminée, quand le décideur serait satisfait ou quand l'analyste ne voit pas l'utilité de la poursuite du procédé.

Aussi, toute méthode interactive se présente comme une procédure qui comprend une alternance des étapes de traitement et des étapes de dialogue. Selon la problématique retenue, ces procédures doivent aboutir :⁴³

- à faire émerger dans A un petit nombre d'actions que le décideur accepte de sélectionner (Pa),
- à faire reconnaître pour chaque action de A la catégorie à laquelle il convient, selon le décideur, de l'affecter (Pb),
- à structurer A selon un préordre partiel ou complet conforme aux préférences du décideur (Pg)

Les méthodes multicritères peuvent être divisées en deux grandes catégories⁴⁴ :

⁴¹ Ginting. R, intégration du système d'aide à la décision multicritères et du système d'intelligence économique dans l'ère concurrentielle, Thèse de Doctorat, l'Université de droit et des sciences d'Aix-Marseille, 2000.

⁴² Pomerol J. C and Barba Romero. S, "Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice". F. S. Hillier (Ed.), International Series in Operations Research & Management Science. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publisher, 2000.

⁴³ Ginting. R, intégration du système d'aide à la décision multicritères et du système d'intelligence économique dans l'ère concurrentielle, Thèse de Doctorat, l'Université de droit et des sciences d'Aix-Marseille, 2000.

⁴⁴ Andresen. I, A Multi-Criteria Decision-Making Method for Solar Building Design, PhD-dissertation, the Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2000.

- Les méthodes de la prise de décision multi-objectifs « Multiple Objective Decision Making, MODM » : Elles s'occupent de l'identification d'une solution préférée parmi un ensemble de solutions potentiellement infinies. Les solutions ne sont pas définies explicitement, mais implicitement par un ensemble de contraintes. De loin, la majorité des approches MODM utilisent la programmation mathématique d'une manière quelconque.
- Les méthodes de la prise de décision multi-attributs « Multiple Attribute Decision Making » (MADM) : Elles sont définies comme étant « *la prise de décision de préférence (par exemple évaluation, classement par ordre de priorité, sélection) au sein de solutions disponibles caractérisées par des attributs multiples souvent en conflit habituellement* » (Yoon et Hwang 1995). La méthodologie de MADM est conçue pour les problèmes concernés par l'évaluation et le choix entre des solutions discrètement définies.

Le tableau.4.1 ci-dessous résume les caractéristiques des deux approches.

	MODM	MADM
Critères définis par	objectifs	attributs
Objectifs définis	explicitement	implicitement
Attributs définis	implicitement	explicitement
Contraintes définis	explicitement	implicitement
Alternatives définies	implicitement	explicitement
Le nombre des alternatives	Infini (large)	Fini (petit)
Le contrôle du décideur	considérable	limité
Paradigme de modélisation de la décision	Processus orienté	Outcome orienté
Approprié pour	Conception/recherche	Evaluation /choix

Le tableau 4.1 Comparaison de MODM et MADM Source : Hwang, C. L. and Yoon, K. (1981)

Les méthodes MADM et de MODM peuvent être aussi classifiées comme une prise de décision individuelle et une prise de décision collective selon la structure de l'objectif de préférence. S'il y a un objectif de préférence unique, le problème est considéré en tant que prise de décision individuelle indépendamment du nombre de décideurs impliqués dans le

processus. Cependant, si l'individu ou les groupes ont des buts de préférences différents, le problème devient une prise de décision collective (Malczewski, 1997)⁴⁵.

Les méthodes MODM ne sont pas adéquates pour être intégrées dans le processus de conception architecturale. Tout d'abord cela à cause à leur forme mathématique compliquée. Malgré l'utilisation des ordinateurs peut faciliter leur intégration, il est toujours important que les utilisateurs comprennent la théorie derrière le fondement de ces méthodes afin de les employer correctement. En outre, les méthodes de MODM exigent la formulation explicite des contraintes et des objectifs sous forme d'équations avant leur application. Il est difficile d'obtenir cela dans le cas de la conception architecturale. En plus, elles exigent beaucoup de temps pour rassembler les données alors qu'il y a peu de temps dans le processus de la conception architecturale pour la compréhension de ces procédures très sophistiquées particulièrement dans les phases initiales de la conception. Ainsi, dans la revue de la littérature, il y a peu d'applications pratiques de ces méthodes dans la planification et la conception des projets. Au contraire de MODM il est beaucoup plus facile de comprendre et appliquer les méthodes MADM, et puisque la conception architecturale est infiniment liée à l'évaluation de différentes alternatives de conception, MADM pourraient être utiles. C'est pour ça, le reste de la discussion sera consacré aux méthodes MADM seulement.

IV.4 Les différentes méthodes multicritères de la prise de décision:

IV.4.1 Aggregate value function approaches (USA):

IV.4.1 .1 SMART « Simple Multi-Attribute Rating Theory »:

Elle a été développée par Edwards en 1971 qui a essayé de faire une version plus simple de la théorie de l'utilité multi attributs « MAUT »⁴⁶. MAUT incorpore le concept de la fonction de l'utilité, tandis que SMART emploie la fonction de valeur. Une fonction d'utilité diffère d'une fonction de valeur du fait qu'elle tient compte de l'attitude pour le risque. Les fonctions de valeur et leurs procédures d'évaluation sont moins compliquées. Edwards a été déçu par les mesures compliquées de MAUT et, de ce fait, a cherché des procédures simples. La version la plus récente de SMART comprend les 10 étapes suivantes⁴⁷ :

⁴⁵ Şener. B, Landfill site selection by using geographic information systems, Master of science in geological engineering, The graduate school of natural and applied science of middle east technical university, 2004.

⁴⁶ Andresen. I, A Multi-Criteria Decision-Making Method for Solar Building Design, PhD-dissertation, the Norwegian University of Science and Technology, Norway,2000.

- Identifier l'organisation dont les valeurs doivent être maximisées.
- Identifier le but de l'obtention de valeur (elicitation).
- Identifier les alternatives qui doivent être évaluées.
- Identifier les dimensions appropriées de la valeur (les attributs).
- Ranger et classer les dimensions par ordre d'importance.
- Estimer le rapport de l'importance relative de chaque attribut relativement à celui classé le moins important.
- Additionner les poids d'importance ; diviser chacun par la somme.
- Mesurer la valeur relative de chaque alternative sur chaque dimension en employant une échelle de 0 à 100.
- Calculer les valeurs globales en employant la méthode SAW (simple additive weighting).
- Choisir l'alternative qui maximise la valeur globale.

IV.4.1.2 SAW: Simple additive weighting

Elle est la plus ancienne méthode, très simple et la plus connue et utilisée en pratique (Ginevicius et autres 2008 ; Ginevičius, Podvezko 2006 ; Podvezko 2011). Dans la méthode SAW, des scores finaux de chaque alternative sont calculés et classés. Dans cette méthode l'intégration des critères de valeurs et les poids se fait par une seule grandeur (Ginevičius, Podvezko 2009⁴⁸. Les alternatives comparées devraient être classées en suivant un ordre décroissant. La méthode SAW est la base de la plupart des méthodes MADM comme AHP et PROMETHEE qui emploient sa propriété additive pour calculer les scores finaux des alternatives⁴⁹.

Les formules mathématiques de la méthode :

$$S_{SAW} = \max_j \sum_{i=1}^m x_{ij} \times w_i, \quad j = 1, \dots, n.$$

w_i C'est le poids du critère.

S_{SAW} C'est le score total de la solution ou l'alternative.

n c'est le nombre des critères.

x_{ij} C'est la valeur normalisée elle est calculé comme suivant :

⁴⁸ Stankevičienė. J, "Valuation model of new start-up companies: Lithuanian case", 2012, P.240–249.

⁴⁹ Memariani. A et al, "Sensitivity Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW): The Results of Change in the Weight of One Attribute on the Final Ranking of Alternatives", Journal of Industrial Engineering 4, 2009, 13- 18.

$$X_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^{min}}{a_j^{max} - a_j^{min}} \dots\dots\dots\text{pour les critères maximisés}$$

$$X_{ij} = \frac{a_j^{max} - a_j}{a_j^{max} - a_j^{min}} \dots\dots\dots\text{pour les critères minimisés}$$

a_j^{max} C'est la valeur maximale du critère.

a_j^{min} C'est la valeur minimale du critère.

a_{ij} C'est la valeur brute de la simulation.

IV.4.1 .3 The analytical hierarchy process AHP:

La méthode AHP proposée par Saaty (1996) est une approche efficace pour extraire les poids relatifs d'importance des critères dans un problème spécifique de prise de décision⁵⁰. Cette méthode de décision décompose un problème complexe de décision multicritère en suivant une structure hiérarchique (Saaty, 1980), voir fig.4.7. La méthode AHP est également une théorie de mesure qui donne la priorité à la hiérarchie et la consistance et l'uniformité des données de jugement fournies par un groupe de décideurs⁵¹. Harker et Vargas (1987) ont expliqué le processus de l'évaluation numérique dans leur recherche portant sur la théorie de l'estimation de l'échelle du ratio. Selon eux la conversion en poids numériques permet aux éléments divers d'être comparés d'une manière cohérente, consistante et rationnelle ce qui explique l'avantage d'employer la méthode AHP (Sataay, 2008)⁵².

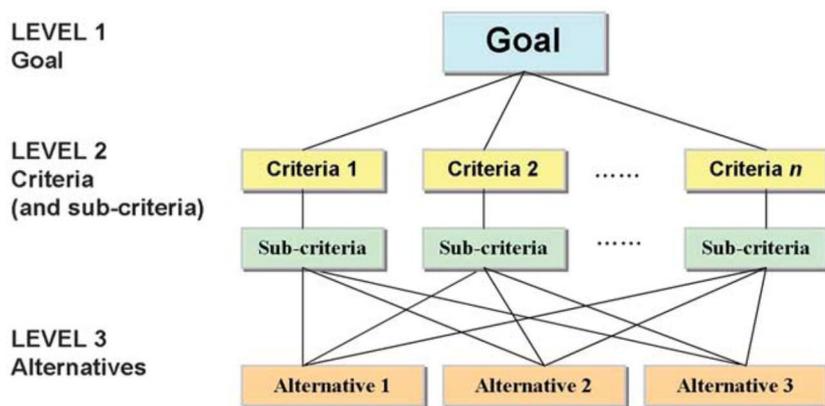


Fig.4.7 La décomposition hiérarchique d'un problème à AHP. Source: Yung. Y (2009)

⁵⁰ Jin Su. J et al, "A Spatial Assessment for Re-Mixing Buildings on the Rural Fringe of Spain", Proceedings REAL CORP ,Tagungsband, 14-16 May ,2012.

⁵¹ Mir B. Arya Nezhad et al, "Using Multi-Attribute Decision Making For Designing Revised Balanced Scorecard In National Iranian Oil Products Distribution Company", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(8): 1151-1162, 2011.

⁵² Bilge G. C and Sharmin. A, "A Conceptualization for Using Analytical Hierarchy Process in Green Building Market Research", 48th ASC Annual International Conference Proceedings, the Associated Schools of Construction, 2012.

IV.4.2 Les méthodes de surclassement (France) :

IV.4.2.1 PROMETHEE (Preference Ranking Organisations Method for Enrichment Evaluations):

Elle est une méthode additive de surclassement développée par Brans et Vincke en 1985⁵³. La méthode PROMETHEE mène au développement d'une relation de surclassement qui peut être employée pour choisir les meilleures solutions (PROMETHEE I) ou pour ranger les solutions de la plus préférée à la moindre préférée (PROMETHEE II). Dans cette méthode tous les paramètres ont une valeur, de sorte que le décideur puisse immédiatement les interpréter. Quant à la modélisation des préférences, le décideur peut choisir entre différents graphes pour chaque critère. Le degré de préférence d'une alternative « a » par rapport à l'alternative « b » peut varier de 0 qui signifie l'indifférence, en passant par une zone de préférence faible jusqu'à 1 qui indique une préférence stricte. Six types de critères généralisés sont présentés dans la fig.4.8 qui pourrait couvrir la plupart des problèmes de la décision, mais le décideur peut modéliser ses préférences avec l'aide des fonctions de préférence spécifiquement configurées.

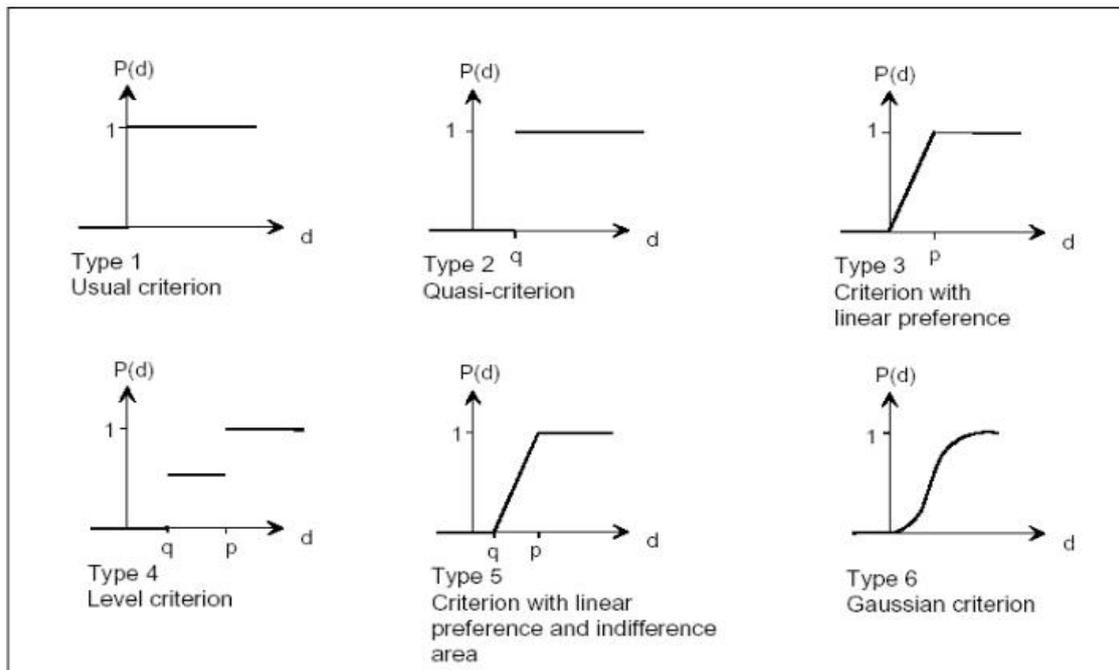


Fig.4.8 Les critères généralisés pour la méthode PROMETHEE .Source : Moeffaert (2002).

⁵³ Harruttugil. Te et al, “conceptual framework for potential implementations of multi-criteria decision making (MCDM) methods for design quality assessment”, Management and Innovation for a Sustainable Built Environment ISBN, 23 June 2011, Amsterdam, The Netherlands.

Il convient de noter que le type 1 et le type 3 des critères généralisés peuvent également être modélés en adaptant le type 5 en considérant les valeurs de q et p égales à 0. Aussi, avec $p = q$, le type 2 (quasi-critère) pourrait être modélé.

Il y a six étapes à suivre dans la méthode PROMETHEE :

- Étape 1 : Pour chaque critère, la fonction de préférence est choisie : voir fig.4.9. La fonction de préférence $P(a, b)$ et la fonction de différence d ($d = f(a) - f(b)$) expriment l'intensité de la préférence de « a » par rapport à « b ». Plus d est élevé plus « a » est préféré par rapport à « b ».

$$0 \leq P(a, b) \leq 1, \text{ ou}$$

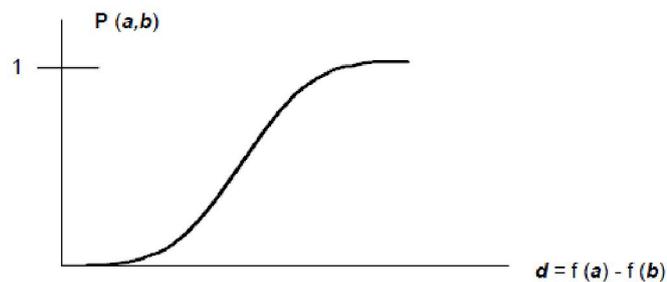
$P(a, b) = 0$ si $d \leq 0$ ($f(a) \leq f(b)$) y a pas de préférence. C'est l'indifférence.

$P(a, b) \approx 0$ si $d > 0$ ($f(a) > f(b)$) préférence faible.

$P(a, b) \approx 1$ si $d \gg 0$ ($f(a) \gg f(b)$) préférence forte.

$P(a, b) = 1$ si $d \gg \gg 0$ ($f(a) \gg \gg f(b)$) préférence stricte.

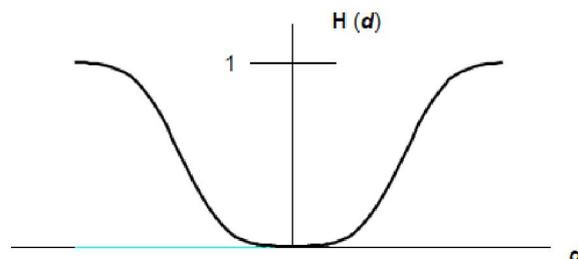
Cette fonction de préférence $P(a, b)$ a la forme suivante :



Source: Brans and Mareschal (1990, p. 222) cité par Omann (2004)

Alternativement, si la minimisation des critères est également considérée, une fonction de préférence $H(d)$ résulte, tenant compte des deux directions.

$$H(d) = \begin{cases} P(a, b) & d \geq 0 \\ P(a, b) & d \leq 0 \end{cases}$$



Source: Brans and Mareschal (1990, p. 222) cité par Omann (2004)

***Index de préférence :**

Après avoir défini l'ensemble des scores d'évaluation f_j , la déviance de l'évaluation d_j et le graphe de préférence P_j correspondant au graphe de surclassement pour chaque paire d'options et critères, un index de préférence $\pi(a, b)$ de « a » par rapport à « b » doit être défini.

Etant donné les ensembles $\{f_j(a), f_j(b); d_j = f_j(a) - f_j(b); P_j(a, b)\}$

$\forall a, b \in A, \forall j = 1, 2, \dots, m,$

Un index de préférence peut être défini $\pi(a, b) = \sum_j w_j \cdot P_j(a, b) \quad \sum_j w_j = 1,$

Où w_j représente les poids relatifs associés à chaque critère j .

$\pi(a, b)$ exprime comment et avec quelle intensité a domine b et $\pi(b, a)$ exprime comment b domine a .

Pour $\pi(a, b)$ les valeurs ont les caractéristiques suivantes :

$$0 \leq \pi(a, b) \leq 1,$$

$\forall a, b \in A,$

$\pi(a, b) = 0$ si $a = b$ l'option a ne peut pas être préférée à elle-même.

$\pi(a, b) \approx 0$ implique une préférence globale faible de a par rapport à b .

$\pi(a, b) \approx 1$ implique une préférence globale forte de a par rapport à b

Les mêmes valeurs peuvent être établies pour $\pi(b, a)$. Les valeurs $\pi(a, b)$ et $\pi(b, a)$ sont calculées.

Pour chaque paire $a, b \in A$, qui mène au graphe de surclassement sur A , deux ordres complets préordonnés sont alors construits. Le premier est le soi-disant « écoulement sortant » $\varphi^+(a)$, qui range les options suivant un ordre décroissant tels que $\varphi^+(a) = \sum_{b \in A} \pi(a, b)$.

Le second est le soi-disant « l'écoulement entrant » $\varphi^-(a)$, suivant un ordre croissant tels que $\varphi^-(a) = \sum_{b \in A} \pi(a, b)$.

L'écoulement sortant exprime à quel point l'option a surclasse toutes les autres options et l'écoulement entrant exprime à quel point l'option a est surclassé par toutes les autres options. Plus l'écoulement sortant de a est grand, plus l'option a est meilleure, et plus l'écoulement entrant de a est petit, plus l'option a est meilleure. Voir fig.4.9.

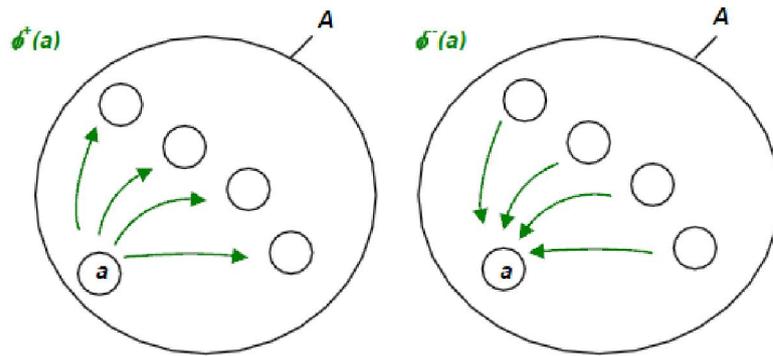


Fig.4.9 La représentation graphique des deux écoulements. Source: Brans and Mareschal (1990, p. 227) Cité par Omann (2004)

IV.4.2.2 les méthodes ELECTRE :

La méthode ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité), ou plutôt les différentes versions de la méthode ELECTRE sont bien connues en France et en Europe. La méthode ELECTRE (sous ses diverses formes) a été conçue par Bernard Roy (1968, 1991) en réponse aux insuffisances des méthodes existantes de la prise de décision⁵⁴. Bernard Roy avait critiqué les méthodes de fonction de valeur du fait qu'elles exigent que toutes les options soient comparables. Les méthodes ELECTRE ont plusieurs versions : ELECTRE I, II, III, ELECTRE IS, et ELECTRE TRI. Toutes les méthodes ELECTRE sont basées sur les mêmes concepts fondamentaux, mais diffèrent en termes de fonctionnement et le type du problème de décision. Spécifiquement, ELECTRE I avait été conçue pour les problèmes de choix, ELECTRE TRI pour l'affectation des problèmes et ELECTRE II, III et IV pour des problèmes de classement. ELECTRE II est une version ancienne, ELECTRE III est employée quand il est possible et souhaitable de mesurer l'importance relative des critères et ELECTRE IV est employée quand cette quantification n'est pas possible. Le choix de la méthode lui-même est un problème multicritère. Le résumé des caractéristiques des versions ELECTRE est présenté dans le tableau 4.2.

		PROBLÉMATIQUE			
SURCLASSEMENT	CRITÈRE	α	β	γ	δ
Net	Vrai-critère	I	-	II	-
Flou	Pseudo-critère	I S	TRI	III, IV	-

Tableau.4.2. Les caractéristiques des versions ELECTRE

⁵⁴ Buchanan. J et al, Project ranking using ELECTRE III, 1999.

Dans l'élaboration du projet architecturale on fait face à un problème de rangement « ranking » des solutions ou alternatives. Aussi, notre discussion portera seulement sur la méthode ELECTRE III.

IV.4.2.2.1 méthode ELECTRE III :

La méthode d'analyse multicritère Électre III a été conçue par Roy en France en 1978⁵⁵. Elle est une technique basée sur plusieurs critères et peut faire un surclassement dans un ensemble de solutions potentielles à un problème de décision et elle est, de nos jours, la méthode la plus utilisée (Huang W.C, Chen C.H, 2005)⁵⁶. De plus, elle incorpore la nature floue (imprécise et incertaine) de la prise de décision, en employant des seuils d'indifférence et de préférence.

La méthode comprend les étapes suivantes :

- La construction de la relation de surclassement
- L'emploi de la relation de surclassement.

En considérant par exemple deux solutions architecturales (deux bâtiments) X, S. En suit, on fait une comparaison entre les valeurs de performance du bâtiment X avec celles du bâtiment S. La comparaison doit donner pour chaque critère un indice de concordance et un indice de discordance pour affirmer que l'un des deux bâtiments surclasse l'autre.

Pour faire ainsi, un seuil de préférence p_i , indifférence q_i et un veto v_i pour chaque critère sont définis. Le seuil de préférence p_i indique la différence de performance concernant le critère i pour affirmer que le bâtiment X est au moins aussi bon que le bâtiment S selon le critère examiné. Si la différence de performance $X_i - S_i$ est plus grande que p_i alors X surclasse S ou en d'autres termes X est préféré à S avec un indice de concordance $C_i=1$

En ce qui concerne le critère i (voir fig.4.10). Si la différence de performance est entre q_i et p_i alors $0 < C_i < 1$ (Favre ,1981)⁵⁷. Si la différence de performance est entre $-q_i$ et $-p_i$, l'indice de discordance, alors $0 < d_i < 1$.

Si la différence de performance est plus grande que V_i ; même si tous les critères sont en accord avec l'hypothèse de surclassement, le surclassement est rejeté. En d'autres termes, y a une grande opposition à l'affirmation. Une fois les indices individuels de concordance et de discordance sont calculés pour chaque paire de bâtiments comparés, une relation de

⁵⁵ Diaby. M et al, « Utilisation d'une méthode multicritère d'aide à la décision pour le choix des clones d'hévéa à planter en Afrique », *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2010, **14** (2), 299-309.

⁵⁶ Catalina.T, *Estimation of residential buildings energy consumptions and analysis of renewable energy systems using a multi-criteria decision methodology*, these de doctorate, L'institut nationale des sciences appliqués de Lyon, juillet 2009.

⁵⁷ Roulet. C et al. "ORME: A multi-criteria rating methodology for buildings", *Building and Environment* 37 2002, 579 – 586.

surclassement globale doit être établie. Cette relation de surclassement pourrait être R (incomparable), P (préférée), ou I (indifférente). Les étapes pour établir cette relation sont les suivantes :

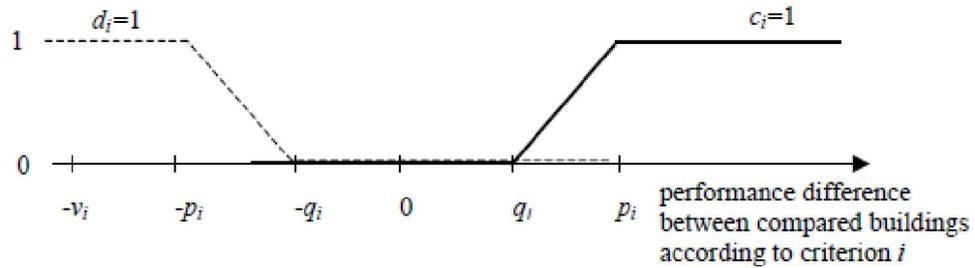


Fig.4.10 Indexe de concordance et de discordance. Source: Roulet. C et al. (2002)

- Le calcul de l'indice global de concordance de chaque affirmation (X surclasse S ; S surclasse X... etc.). Cet indice est l'indice pondéré c_i . Pour le couple X et S par exemple $c(X ; S)$ est calculé comme suit :

$$c(X, S) = \frac{\sum_i c_i W_i}{\sum_i W_i} \quad \text{ou } c(X, S) \text{ est entre } 0 \text{ et } 1$$

- Le calcul de l'indice de crédibilité pour chaque affirmation qui est l'indice global de concordance $C(X ; S)$ affaibli par les indices de discordance qui sont plus grands que l'index global de concordance. Pour l'affirmation X surclasse S par exemple

$$\sigma(x; s) = C(x; s) \prod_{i \in F} \frac{1 - d_i(x, s)}{1 - c(x, s)} \quad F = \{i : d_i(x, s) > c(x, s)\}$$

La définition de l'indice de crédibilité est établie pour qu'une opposition singulière forte le rende égal à zéro. Le produit se tient sur tous les critères pour lesquels $d_i > c(x, s)$. A partir de l'indice de crédibilité de chaque paire de bâtiments et un seuil de d'acceptation λ , une relation globale de surclassement peut être établie. La Figure (4.11) illustre l'arbre de décision pour les bâtiments X et S. Le seuil de l'acceptation, λ , est une constante pratique qui reflète la tolérance de la méthode de rangement à l'incomparabilité. Les bâtiments sont comparés paire par paire. Une série de bâtiments peut être assortie par des comparaisons successives.

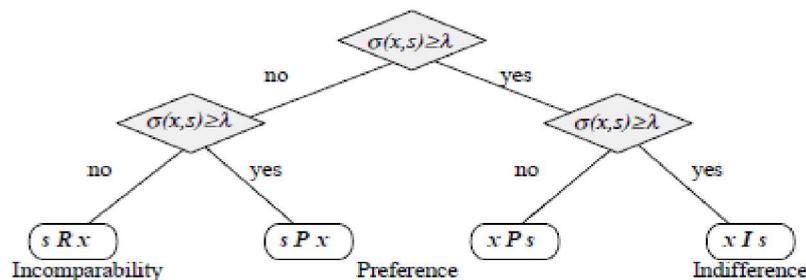


Fig.4.11 l'arbre de décision. Source: Roulet. C et al (2002)

IV.4.3 Discussion :

Les méthodes de surclassement ne permettent pas la compensation, de sorte qu'un bâtiment qui montre une mauvaise performance par rapport à un critère ne peut pas compenser cette pauvreté par sa bonne performance par rapport à un autre critère. Ainsi, ces méthodes exigent la définition des poids, qui permet à l'utilisateur d'avoir son échelle de valeur. Cela est très utile car un choix ne peut jamais être objectif et reflète toujours une échelle de valeur. Une fois cette échelle donnée, le rangement « ranking » est objectivement obtenu.

Cependant, tant que l'utilité des relations de surclassement dépend complètement des valeurs des seuils de concordance, de dis-concordance, d'indifférence, de préférence et de veto. Le processus expérimental pour trouver les valeurs appropriées de ces dernières est complètement arbitraire. Ainsi, le choix de la procédure pour employer les relations de surclassement dépend de la nature du problème. Cela signifie que les résultats varient selon la procédure utilisée. En outre, par l'emploi des méthodes de surclassement, quelques actions incomparables deviennent comparables parce que l'information réaliste existe, mais d'autres actions restent, néanmoins, incomparables.

Puisqu'une comparaison entre toutes les alternatives et tous les critères est nécessaire pour atteindre une conclusion, ces méthodes ne peuvent pas répondre à nos objectifs. Belton (1990) voit que les méthodes ELECTRE sont utiles pour esquisser et clarifier le problème, et probablement identifier un petit ensemble de solutions pour une analyse détaillée. Cependant, l'information requise pour cela est tout à fait substantielle et large. Le plus important, aucune des échelles employées par ces méthodes ne permet les opérations de l'addition et de la multiplication, ce qui signifie que les résultats de ces méthodes restent dépourvus de sens.

L'inconvénient le plus important des méthodes de surclassement par rapport à leur usage en conception architecturale, est le fait qu'elles sont très difficiles à comprendre pour les personnes qui ne sont pas des experts dans le domaine. Les experts eux-mêmes admettent qu'il est difficile d'interpréter les résultats de ces méthodes. Belton et Stewart (2002) ont stipulé que les méthodes de surclassement devraient plutôt être employées par des experts seulement ou par un personnel qualifié⁵⁸. Par exemple, la définition des critères généralisés dans la méthode PROMETHEE est une tâche très compliquée et exige ainsi un assistant qualifié qui facilite la tâche pour l'équipe de la conception.

⁵⁸ Omann ,I, Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität,2004.

Au contraire des approches de surclassement, les approches de la fonction de valeur sont beaucoup plus intuitives et simples. L'approche la plus simple et directe des approches de fonction de valeur est la méthode « simple additive weighting, SAW ». Cette méthode est la plus utilisée dans le domaine de la conception. Outre la méthode SAW, la méthode AHP présente également des avantages indéniables. Elle offre tout d'abord une manière formelle et logique d'inclure des valeurs qualitatives dans l'analyse décisionnelle. Ainsi, le contrôle de la cohérence et la consistance peut nous aider à découvrir les distorsions et les contradictions dans les jugements. En outre, la manière hiérarchique de structurer le problème peut nous aider à aborder et comprendre le problème dans sa totalité ainsi que le système de valeur. Cependant, ces méthodes sont chargées de difficultés. La méthode SAW repose sur des hypothèses trop restrictives et peu conformes à la réalité. Ainsi, la valeur finale d'une alternative est le résultat de la multiplication des valeurs de performance de cette alternative par rapport à chaque critère par le poids de ce critère et la somme de toutes ces valeurs pondérées ensemble. La performance finale est employée pour choisir une alternative. La méthode SAW implique une arithmétique simple et appropriée seulement si les critères répondent à la condition de « préférence indépendance », autrement dit, les points assignés aux alternatives par rapport à un critère ne sont pas les mêmes points assignés à un autre critère. D'ailleurs, il y a d'autres inconvénients de la méthode SAW. Certains chercheurs confirment que la valeur d'un projet n'est pas une simple fonction additive de la valeur de ses divers composants ou même une fonction multiplicative aisément identifiable (Roy et Bouyssou 1986)⁵⁹. Aussi, les poids attribués aux critères par le décideur sont généralement trop approximatifs. En plus, l'affectation des poids à certains critères pose problème ; les décideurs refusent de se prononcer sur l'importance relative de certains critères. De ce fait, avoir recours à une simple pondération des critères pour définir la fonction d'utilité, présente le risque d'obtenir des résultats peu fiables. Enfin, dans la pratique, on constate un manque de cohérence entre les paramètres qui définissent la fonction d'utilité et les préférences du décideur. En définitive, il s'avère que les hypothèses de la méthode SAW sont trop contraignantes et la définition qu'elle donne à la fonction d'utilité multiattribut est bien fragile.

La comparaison par paires et les rapports des solutions ne peuvent pas être employés dans la construction des échelles de préférence auxquelles les opérations de l'addition et de la

⁵⁹ Andresen. I, A Multi-Criteria Decision-Making Method for Solar Building Design, PhD-dissertation, the Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2000.

multiplication s'appliquent. Pour que l'addition et la multiplication soient appliquées sur les valeurs d'échelle de préférence, les solutions doivent correspondre aux points sur une ligne droite dans une géométrie affine (Barzilai, 2005)⁶⁰. Ainsi, la comparaison par paires peut mener le décideur à ressentir qu'il perd la vue d'ensemble du problème. Le lien entre les comparaisons par paire sur l'échelle de rapport et le rangement final des solutions est compliqué. Le décideur met l'accent sur des petites parties du problème à la fois, et quand le résultat final est présenté, il est difficile de voir les détails du rapport « cause-effet ». Si le décideur ne comprend pas ce rapport, il pourrait être difficile d'accepter le résultat et c'est peut-être l'inconvénient le plus sérieux de la méthode en ce qui concerne son usage dans la conception du bâtiment. En plus, des inquiétudes ont été exprimées concernant la convenance de la conversion de l'échelle sémantique à l'échelle numérique employée par Saaty comme mesure de la force de la préférence. Une échelle sémantique ou verbale n'a aucune base mathématique. Aussi, quand il y a beaucoup d'attributs, le nombre de comparaisons par paire devient grand. Cela est considéré un inconvénient parce que le temps est limité dans la conception architecturale. Aussi, la normalisation est faite dans diverses étapes de calcul dans la méthode AHP. La normalisation est une opération mathématique et, comme n'importe quelle autre procédure mathématique, son utilisation dans n'importe quelle méthodologie doit être justifiée, mais cette opération n'a pas été justifiée dans la littérature d'AHP (Barzilai, 2001)⁶¹. En plus, outre la compréhension de ce que les attributs impliquent réellement, les relations dans les comparaisons par paires doivent être interprétées d'une façon cohérente (c.-à-d. les échelles doivent être employées de la même manière pour tous les attributs). De ce fait, le décideur doit avoir une très bonne compréhension et maîtrise des termes comme « plus préférable modérément », « plus préférable fortement »...etc. C'est pourquoi, le processus de répondre aux questions de comparaison par paire d'une manière cohérente peut être déroutant et peu clair pour les décideurs.

Malgré le fait que la légitimité de la méthode SAW reste contestée, elle est en fait la plus utilisée généralement des méthodes multicritère de la prise de décision. Cela est dû à sa simplicité et à son charme intuitif. En outre, plusieurs études ont prouvé que SAW donne des approximations extrêmement étroites à des formes non linéaires beaucoup plus

⁶⁰ Ruud BINNEKAMP.D, Reference-based design in architecture, Thèse de Doctorat, Delft technical university, 2010.

⁶¹ Ibid

compliquées, tout en restant bien plus facile à comprendre (Hwang et Yoon 1981)⁶². Quant à la méthode AHP, le fait qu'elle est basée sur des feedbacks qui permettent aux concepteurs de vérifier la cohérence de leurs jugements. Elle peut nous aider dans notre travail.

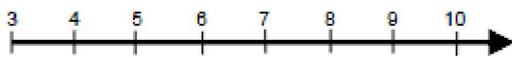
IV.5 Attribution des valeurs de performance :

Une valeur (score ou point) doit être assignée à chaque alternative pour indiquer sa performance par rapport à chaque critère. Une échelle de mesure est essentiellement un moyen d'assigner des valeurs à chaque alternative. Il y a beaucoup de types de ces échelles. Stevens (1946)⁶³ a proposé la classification suivante :

- L'échelle ordinale: elle fournit des informations sur l'ordre seulement.
- L'échelle d'intervalle : elle fournit une mesure de la différence entre deux solutions ou alternatives, mais elle n'indique pas la grandeur réelle.
- L'échelle de ratio : elle a une origine naturelle et fournit une mesure de différence et de grandeur. La figure (4.12) illustre ces trois échelles.



L'échelle ordinale. Nombres dans l'ordre croissant, par exemple 5 plus grand que 4.



L'échelle d'intervalle. Les intervalles sont égaux, par exemple $7-4 = 9-6$



L'échelle de ratio. Les rapports sont égaux, par exemple $3:1 = 6:2$

Fig.4.12 Les échelles de mesures

Les termes qualitatifs et le nombre ordinal sont employés de façon interchangeable alors que les termes quantitatifs sont réservés pour les échelles d'intervalle et de ratio. L'évaluation des données joue un rôle crucial dans l'analyse de décision, car les résultats obtenus par l'application des méthodes multicritères de la prise de décision sont fortement liés aux valeurs réelles assignées à ces paramètres d'entrée (Wolter et Mareschal, 1995)⁶⁴. L'échelle qualitative définit l'attribut, ses points d'extrémité, et peut-être quelques points

⁶² Andresen. I, A Multi-Criteria Decision-Making Method for Solar Building Design, PhD-dissertation, the Norwegian University of Science and Technology, Norway,2000.

⁶³ Ruud BINNEKAMP.D, Reference-based design in architecture, Thèse de Doctorat, Delft technical university, 2010.

⁶⁴ Hyde K. M, Uncertainty analysis methods for multicriteria decision analysis, Thèse de doctorat, Adelaide University, May 2006.

intermédiaires par des moyens de description verbale. Pour comparer cette échelle qualitative avec une échelle quantitative, les descriptions qualitatives sont associées aux nombres qui rapportent les préférences du décideur au niveau de l'échelle qualitative. Cette approche « directe » d'évaluation a été critiquée du fait qu'elle n'a pas une base théorique. Cependant, les études récentes stipulent qu'une justification théorique pour la quantification des significations vagues des termes linguistiques inexacts par le moyen d'estimation directe peut être établie (Munda1995)⁶⁵.

Une des manières communes pour la conversion des attributs qualitatifs en une échelle d'intervalle est l'emploi de l'échelle bipolaire ou l'échelle de Linkert (McIver et Carmines 1981 ; Spector 1992). Un ensemble de déclarations, composé approximativement de nombres égaux de déclarations favorables et défavorables couvrant les attributs qualitatifs, est construit. Par exemple, l'échelle 5-points peut être choisie (voir fig.4.13). L'échelle peut être calibrée en commençant par les points des extrémités, en donnant 5 points à la valeur maximale qui est pratiquement ou physiquement réalisable, et 1 point à la valeur d'attribut minimale qui est pratiquement réalisable. Le point au milieu représente également la base du calibrage et le point de rupture entre les valeurs favorables (ou meilleures que la moyenne) et les valeurs défavorables (ou plus mauvaises que la moyenne). Cependant, il est peut être difficile de déterminer les points dans l'intervalle. Le décideur est invité à sélectionner une déclaration qui décrit mieux la propriété d'attribut donné.

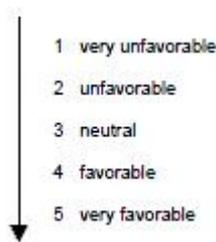


Fig.4.13 l'échelle de 5-points

L'analyste opérationnel hollandais Freerk A. Lootsma a présenté un modèle intéressant pour mesurer les données quantitatives et qualitatives sur une échelle de la notation 7 (Lootsma 1999)⁶⁶. La justification de la procédure est basée sur des arguments des sciences comportementales et de la psychophysique. Lootsma a stipulé que les êtres humains suivent un modèle uniforme dans beaucoup de secteurs indépendants quand ils subdivisent une échelle particulière en sous-intervalles égaux subjectivement. Les exemples sont le son

⁶⁵ Andresen, I, A Multi-Criteria Decision-Making Method for Solar Building Design, PhD-dissertation, the Norwegian University of Science and Technology, Norway,2000.

⁶⁶ Ibid

(l'échelle de dB), le temps, et la lumière...etc. Le nombre des sous-intervalles est petit parce que les humains ont un vocabulaire limité.

Les architectes américains Kirk et Spreckelmeyer (Kirk et Spreckelmeyer 1993) ont décrit une méthode employée pour construire des échelles pour des objectifs de la conception des bâtiments ⁶⁷(voir tableau 4.3). Etant donné un objectif de conception particulier, les membres de l'équipe de conception sont invités à évaluer des extrémités qui pourraient être acceptables et souhaitables dans un problème donné. Des questions sont posées aux décideurs pour stimuler la discussion au sujet de la nature de l'objectif considéré. Ceci permet aux décideurs d'établir les limites supérieures et inférieures ainsi que les points intermédiaires de l'échelle de mesure (ce sont les valeurs 5 et 1 du fig. 4.13). Ensuite, les intervalles entre les points sont examinés pour l'exactitude. Si les intervalles perçus entre le premier et la troisième paire scalaire ainsi qu'entre le troisième et le cinquième sont jugés égaux, alors cette échelle particulière peut être considérée valide. Après que toutes les comparaisons parmi les divers intervalles scalaires soient accomplies, l'échelle employée pour l'objectif de conception peut être mise à côté et la définition d'un autre objectif soit examinée.

Plusieurs chercheurs affirment que la tâche d'assigner des valeurs aux critères est un processus difficile. Mareschal (1986) a déclaré que beaucoup de critères sont difficiles à mesurer et ne peuvent pas facilement être réduits à une figure simple. McLaren et Simonovic (1999) ont stipulé que les données quantitatives sont cruciales pour la bonne prise de décision, mais il est important de considérer l'origine et la fiabilité de ces données. Si un expert évalue la valeur de performance, sa propre subjectivité pourrait également présenter des distorsions et des incertitudes (Bertrand-Krajewski et autres, 2002). Selon Xu et al (2001), on admet généralement que l'information ordinale soit moins exigeante pour l'expert que l'information cardinale parce que cette dernière exige l'évaluation précise de la performance de l'alternative par rapport à des critères habituellement inexacts, incertains ou même indisponibles⁶⁸.

⁶⁷ Ibid

⁶⁸ Hyde K. M, Uncertainty analysis methods for multicriteria decision analysis, Thèse de doctorat, Adelaide University, May 2006.

Projet : Sièges sociale d'une compagnie Date : 3/23/81 Nom d'objectif : Circulation Numéro d'objectif : 1 Descriptions des objectives :	
Valeur basse	1 Nombre prolongé des employés marchant pour la communication. Système de circulation qui satisfait le mouvement simple, clair, et direct avec sûreté. Circulation mélangée pour des personnes, des véhicules, et le service Accès contrôlé au bâtiment.
	2 Nombre tolérable des employés marchant pour la communication. Système de circulation qui satisfait le mouvement simple, clair, et direct avec sûreté. Circulation séparée pour des personnes, des véhicules, et le service Accès contrôlé au bâtiment.
	3 Nombre modéré des employés marchant pour la communication. Système de circulation qui satisfait le travail, les besoins personnels et la sûreté. Circulation séparée pour des personnes, des véhicules, et le service Accès contrôlé au bâtiment.
	4 Nombre mineure d'employé qui marche à pieds pour la communication. Système de circulation qui améliore le travail et les besoins personnels. Circulation séparée pour des personnes, des véhicules, et le service Accès restreint au bâtiment et stationnement avec l'entrée séparée pour les visiteurs.
Valeur élevée	5 Nombre minimale des employés marchant pour la communication. Système de circulation qui améliore considérablement le travail et les besoins personnels. Circulation séparée pour des personnes, des véhicules, et le service. Accès restreint au bâtiment et stationnement avec les points d'entrée commandés pour des employés et des visiteurs.

Tableau 4.3 L'échelle de Kirk et Spreckelmeyer. Source: Andersen (2000)

IV.6 La normalisation :

L'avantage principal des méthodes multicritères de la prise de décision est le fait qu'elles peuvent manipuler des mesures de performance avec des unités différentes. Cependant, avant d'appliquer quelques méthodes d'évaluation, il est nécessaire que toutes les valeurs de performance soient réduites à une base comparable ou standardisée. La standardisation a pour objectif l'élimination des effets de l'échelle.

Massam (1988)⁶⁹, énumère 5 manières différentes pour la normalisation des données brutes :

$$a- \frac{\text{la valeur brute}}{\sum \text{toutes les valeurs}}$$

$$b- \frac{\text{la valeur brute}}{\text{la valeur maximale}}$$

$$c- \frac{\text{la valeur brute} - \text{la valeur minimale}}{\text{la valeur maximale} - \text{la valeur minimale}}$$

$$d- \frac{\text{la valeur brute}}{\sqrt{(\text{la valeur brute})^2}}$$

e- Fonction de transformation

⁶⁹ Massam B. H, "Multi-criteria decision making (MCDM) techniques in planning", *Progress in Planning*, 30 (Part 1), 1988.

IV.7 La Pondération « Weighting » :

L'attribution des poids aux critères est probablement l'aspect le plus important des méthodes multicritères de la prise de décision parce qu'il permet aux différentes vues et leur impact sur le classement des alternatives d'être exprimées explicitement (Royal Assessment Commission, 1992). Ainsi, le processus de pondération augmente la compréhension du problème (Hamalainen et Salo, 1997). L'importance relative des critères choisis n'est pas perçue également par tout le monde (Georgopoulou et autres, 1998), ce qui signifie que les acteurs donnent différents niveaux d'importance relative pour les divers critères, favorisant naturellement ceux qui reflètent leur propre point de vue, de ce fait des conflits se produisent (Bana e Costa, 1986). Les poids des critères rendent, donc, explicite ces secteurs qui peuvent en fin de compte exiger les solutions de compromis possibles et par conséquent ils mettent l'accent sur les problèmes complexes de la décision (Proctor et Drechsler, 2003). Les méthodes connues de pondération sont énumérées ci-dessous :

IV.7.1 Les méthodes de classement : « Ranking Methods »

Ce sont les méthodes les plus simples pour évaluer l'importance des poids. Selon ces méthodes chaque critère considéré est classé suivant l'ordre de préférence du décideur. En raison de leur simplicité, ces méthodes sont très attrayantes. Cependant, plus le nombre des critères utilisés est grand, plus ces méthodes seraient inappropriées. Un autre inconvénient de ces méthodes est le manque d'une base théorique. Les méthodes les plus employées et connues des méthodes de classement sont la méthode du classement basée sur la pondération réciproque et la méthode du classement basée sur la pondération de la somme. Selon la règle du classement réciproque le poids pour le critère i est calculé comme suit :

$$w_i = \frac{1/R_i}{\sum_{j=1}^n 1/R_j}$$

Là où R_i est le classement du critère i , et n est le nombre de critères.

Dans la procédure de pondération de somme, les poids sont estimés comme suit:

$$w_i = \frac{(n - R_i + 1)}{\sum_{j=1}^n (n - R_j + 1)}$$

IV.7.2 Les méthode de Rating :

Ces méthodes exigent que le décideur estime les poids sur la base d'une échelle prédéterminée. L'une des méthodes de Rating les plus simples est l'approche d'attribution de points "the point allocation approach". Elle est basée sur l'affectation des points allant de 0 à 100, où 0 indique que le critère puisse être ignoré, et 100 représente la situation où seulement un critère a besoin d'être considéré. Une autre méthode est la procédure d'évaluation de ratio qui est une modification de la méthode d'attribution de points. Une valeur de 100 est donnée au critère le plus important et proportionnellement les points les plus petits sont donnés aux critères bas dans l'ordre. Les points assignés à l'attribut le moins important sont employés pour calculer les rapports (ratios). L'inconvénient de cette méthode comme la méthode de classement est le manque de base théorique, c'est pour ça il pourrait être difficiles de justifier les points assignés.

IV.7.3 Les poids d'oscillation « Swing weights »:

Cette méthode commence à partir du critère le plus important comme référence. Le décideur commence par classer l'ordre des critères en termes de leurs valeurs associées. Supposant que chaque critère est à son plus mauvais niveau possible. Le décideur est appelé à déterminer le critère qu'il préfère changer de son plus mauvais niveau à un niveau meilleur. Le critère choisi aura la valeur la plus importante. Le décideur est appelé à déterminer le second critère qu'il préfère changer de son plus mauvais niveau à un niveau meilleure. Pour mesurer les éventails des valeurs relatives, le décideur affecte un poids relatif d'importance entre 0 et 100. Le décideur assigne une valeur de 100 points au critère avec la meilleure oscillation. En suivant cette procédure, le décideur classe les critères suivant leur ordre et assigne les poids relatifs d'importance à leurs valeurs. L'étape finale du procédé de poids d'oscillation est de normaliser l'importance relative des poids (Jia et autres, 1998)⁷⁰. Belton et Stewart (2002)⁷¹ affirment la difficulté de cette méthode en disant « *si une oscillation du plus mauvais au meilleur sur le critère le plus fortement pondéré est assignée une valeur de 100, qu'elle serait la valeur relative d'une oscillation du plus mauvais au meilleur sur le deuxième critère classé ?* »

⁷⁰ Hyde K. M, Uncertainty analysis methods for multicriteria decision analysis, Thèse de doctorat, Adelaide University, May 2006.

⁷¹ Mysiak. J, MDSS Decision Methods, mDSS version 5 guide, September 2010.

IV.7.4 L'analyse des compromis « Trade-off Analysis Method »

Keeney et Raiffa ont introduit cette méthode en 1976⁷². Le décideur est appelé à comparer deux alternatives par rapport à de deux critères à la fois et déterminer l'alternative la plus préférée. Les compromis définissent l'ensemble unique de poids qui permettent à toutes les solutions préférées d'obtenir la même valeur/utilité finale. Les compromis effectués par le décideur entre deux critères quelconques ne dépendent pas des autres critères (Malczewski, 1999)⁷³.

IV.7.5 La méthode de comparaison par paires « pair-wise comparaison »

La méthode de comparaison par paires est efficace parce qu'elle permet au décideur d'avoir une considération complète de tous les éléments du problème de la décision. Un autre avantage de la comparaison par paires est le fait que le décideur doit considérer seulement une paire de deux critères au lieu des évaluations simultanées de plusieurs critères (Leskinen et autres, 2004)⁷⁴.

IV.8 Conclusion :

Dans ce chapitre on a mis en évidence les approches multicritères à travers deux axes :

Le premier axe a dressé une approche analytique de la philosophie des approches multicritères à travers les problématiques du processus décisionnel, l'historique de ces approches, les différents problèmes de décision, les avantages et les inconvénients de ces approches ainsi que leur objectifs alors que le deuxième axe a abordé les différentes classifications des méthodes multicritères, les méthodes les plus connues ainsi que les techniques utilisées pour appliquer les méthodes multicritères (pondération, normalisation et échelles de mesures).

La conception architecturale est un processus de prise de décision complexe. Elle implique des critères qualitatifs et quantitatifs ainsi que des acteurs de différentes disciplines. L'utilisation des méthodes multicritères permet aux décideurs de prendre en compte tous les critères qualitatifs et quantitatifs impliqués dans le processus de la conception architecturale et aux membres de l'équipe du projet de révéler leur choix, intentions et jugements, ce qui favorise la transparence et la multidisciplinarité. Elle permet également

⁷² Hyde K. M, Uncertainty analysis methods for multicriteria decision analysis, Thèse de doctorat, Adelaide University, May 2006.

⁷³ Şener. B, Landfill site selection by using geographic information systems, Master of science in geological engineering, The graduate school of natural and applied science of middle east technical university, 2004.

⁷⁴ Hyde K. M, Uncertainty analysis methods for multicriteria decision analysis, Thèse de doctorat, Adelaide University, May 2006.

d'avoir une vue d'ensemble afin d'effectuer des choix judicieux dans le projet architectural, ce qui aide les architectes d'avoir une évaluation globale de la qualité et la performance des solutions architecturales et s'assurer que tous les critères soient considérés. Elles sont susceptibles d'aider les concepteurs en architecture dès les premières phases de conception du bâtiment, en permettant également la comparaison simple et rapide de différentes solutions architecturales. De ce fait, elles se voient en tant que outils d'aide à la décision et la conception plus qu'des méthodes de conception ou des alternatives aux anciennes méthodes de conception.

Par la structuration de l'objectif par rapport aux différents critères, la transparence de la situation augmente et tous les dimensions des critères ainsi que leurs interdépendances sont développées et considérées, ce qui mène à une meilleure considération de tous les aspects du problème dans le processus de l'évaluation des alternatives. Il est à noter également que la technique de la comparaison par paire semble être utile pour comprendre le problème de conception en détail. De ce fait, il est très important que la méthode ne doit pas être employée de manière erronée pour prendre la décision finale.

La plupart des méthodes sont assez compliquées et exigent une compréhension mathématique (Electre...etc.), ce qui rend leur utilisation assez difficile pour les architectes. Cependant, il y a des méthodes simples qui pourraient être intégrées facilement dans le processus de la conception architecturale comme la méthode « Simple additive weightig ». Cette dernière, puisque l'architecte n'a pas un temps suffisant pendant la phase de l'esquisse et n'est pas assez familiarisé avec les méthodes multicritères, semble la plus adéquate surtout quand les critères impliqués dans la conception du projet architectural sont mutuellement indépendants.

Chapitre cinq

MODELE D'ANALYSE**V.1 Introduction:**

Ce chapitre présente la méthodologie d'approche suivie. Il s'agit dans le premier axe de la phase de simulation comme un moyen de recueillir les données nécessaires pour l'application de la méthode multicritères. La phase de simulation elle-même exige la connaissance des propriétés physiques du cas d'étude (dans notre cas il s'agit d'une école primaire), les conditions climatiques et l'usage de l'école. Le deuxième axe abordera les critères pris en considération dans la simulation comme des indicateurs de performances et en fin l'application de la méthode multicritère.

Notre démarche se compose de trois éléments : la géométrie du cas d'étude, la simulation et en fin l'application de la méthode multicritère « SAW ». Voir fig.5.1

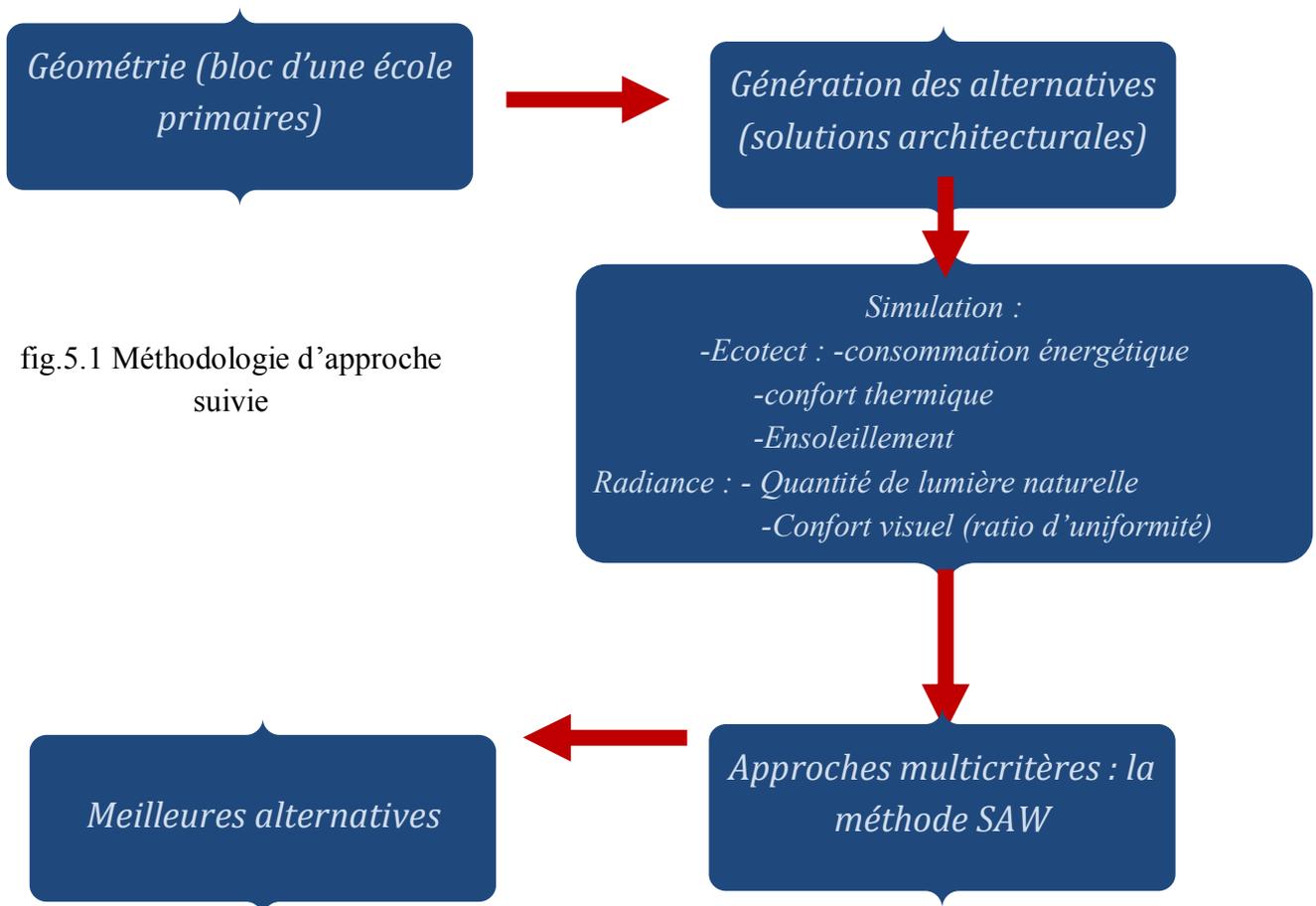


fig.5.1 Méthodologie d'approche suivie

V.2 Géométrie (cas d'étude) :

V.2 .1 Propriété physique de l'école :

V.2 .1.1 Analyse typologique :

Dans les études de la conception des établissements scolaire, la typologie de ces derniers est déduite principalement à partir de la distribution des salles de classe au sein des blocs ainsi que la disposition des corridors. Le modèle stéréotypé des années soixante aux années quatre vingt dix est très répandu. Les salles de classes s'organisent dans des blocs en rez-de-chaussée (A et B) ou avec un seul étage (C et D). Les blocs prennent la forme en « L », « U » ou deux barres parallèles (voir fig.5.2).

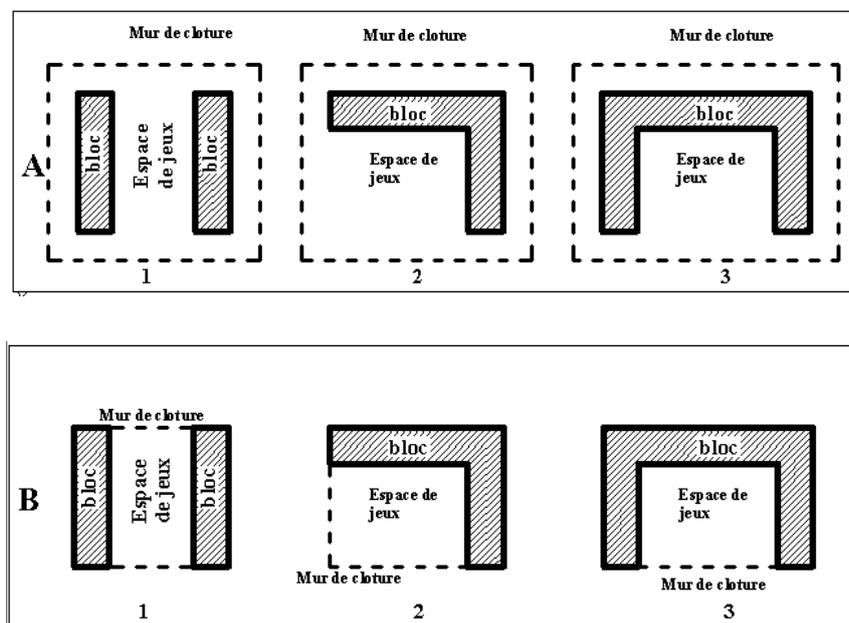


Fig.5.2 la disposition des blocs et le mur de clôture (les écoles stéréotypées). Source : ben cheikh (2006)

Après l'abandon du modèle stéréotypé, les écoles ont changées mais la disposition nouvelle des blocs a gardé la même configuration de celle du modèle stéréotypé et les dimensions des salles de classes ont resté les mêmes.

Les salles de classe se juxtaposent au long d'un corridor dont la largeur est 1,80m à environ 3,00m. Elles se caractérisent par un plan stéréotypé dont la forme est rectangulaire ou carrée avec une hauteur sous plafond d'environ 3,30m.

- Pour la forme rectangulaire : 8,40m x 7,20m ou 9m x 6,60m, ce qui donne respectivement les surfaces $60,48\text{m}^2$ et $59,4\text{m}^2$.
- Pour la forme carrée : 7,80m x 7,80m ($60,84\text{m}^2$)

Chaque classe possède deux orientations opposées, une vers l'extérieur et l'autre vers le corridor. Chaque classe a deux rangées parallèles de fenêtres l'une orientée vers l'extérieure et l'autre vers le corridor.

V.2 .1.2 Le modèle du bloc retenu :

Voyant la manière dont les salles de classes se sont regroupées et l'analyse typologique, on peut déduire que toutes les formes des blocs dans la figure 5.1 prennent comme origine la forme barre. Dans notre travail de recherche on se contente d'étudier la performance globale d'un bloc de forme barre, ensuite on opte pour des rotations de la forme barre suivant les orientations connues, ce qui nous aide à avoir une idée générale sur les autres formes et en trouver la forme optimale ; c'est à dire celle qui répond au mieux à tous les critères considérés.

Nous avons choisi comme objet de simulation dans ce travail, un bloc de forme barre d'une école primaire. Pour l'exécution des simulations, la distribution des classes au sein du bloc peut être simplifiée par le choix d'un nombre restreint de salles (dans notre cas on a opté pour 3 classes) puisqu'elles se comportent de la même manière. En plus, cela diminue significativement le nombre d'entrées dans les logiciels et le temps de calcul des simulations sans préjudice sur la précision des résultats.

Un plan du bloc est illustré dans la figure (5.3). Dans ce plan, chaque salle de classe possède une dimension de 9 x 6,6. La largeur du couloir est 2 mètre.

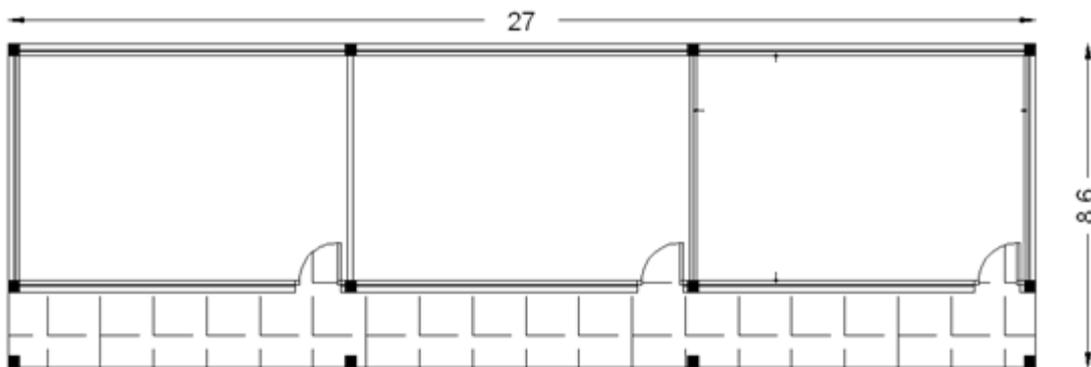


Fig.5.3 Plan du bloc. Source : Auteur

Quant au nombre d'étages, nous avons considéré 1 seul étage (rez-de-chaussée). La hauteur du bloc est 3,5 mètres. Le modèle 3D est présenté dans la figure (5.4).

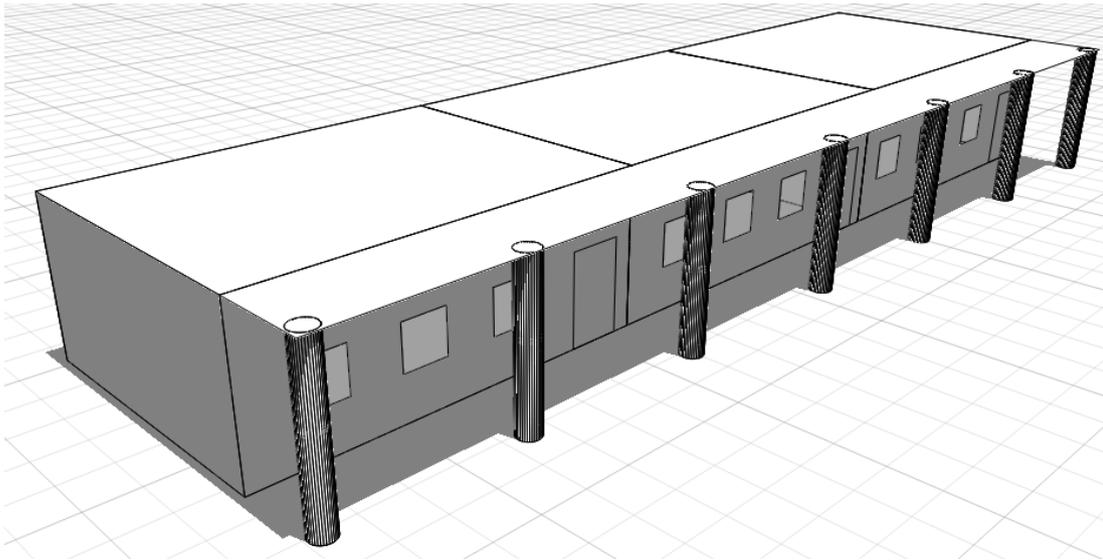


Fig.5.4 Modèle 3D du bloc. Source : Auteur

D'une façon générale, il est habituel en Algérie que ces blocs n'aient pas de système de climatisation centralisé. L'utilisation de la climatisation artificielle dans les locaux n'est pas présente souvent. C'est pour ça, dans notre travail de recherche on présente le bloc muni d'une ventilation mixte (climatisation artificielle + ventilation naturelle).

V.3 La simulation :

La simulation numérique d'une école primaire prévoit l'utilisation de quelques modèles qui décrivent non seulement l'école elle-même, mais, aussi, les conditions externes auxquelles elle sera soumise. La première étape avant d'entamer la simulation est la connaissance des conditions climatiques et l'usage du bloc ;

V.3 .1 Conditions climatiques et usage de l'école :

La connaissance des conditions climatiques est fondamentale pour la simulation d'une construction car le climat décrit les conditions externes qui agissent sur le bâtiment, en influençant son comportement thermique, lumineux et sa consommation énergétique. Dans les outils de simulation numérique, les conditions climatiques interviennent comme des données d'entrée. Ces données sont, généralement, les températures, l'humidité de l'air, les conditions du vent et les niveaux de radiation solaire incidentes sur l'enveloppe du bâtiment. Ces données sont généralement des tableaux fournis par les stations météorologiques.

Normalement, ces données proviennent de mesures réalisées sur le lieu où sera bâtie l'école, mais vu la non disponibilité de quelques données et la limitation du temps, y a une méthodologie utile pour ce travail. Cette dernière consiste de partir d'un grand nombre de valeurs historiques pour créer des jours typiques, représentatif des conditions moyennes et plus probables pour chaque période de l'année. Un avantage de cette approche est le fait qu'elle peut être réalisée sans que les données soient validées pour toute la période. Ces jours théoriques sont appelés des jours typiques. Ils sont un outil très utilisé dans la simulation des bâtiments.

Selon cette approche nous avons établi trois jours typiques pour le climat de la ville de Biskra, ayant comme dates de référence le 21 décembre, le 21 Mars et 21 Mai. Les simulations de la consommation énergétique, le confort thermique et l'ensoleillement sont faites pour une période allant de 8 h de la matinée à 17h du soir, ce qui correspond à la période d'étude des élèves alors que celles de la disponibilité de la lumière naturelle et le confort lumineux sont faites à 10h de la matinée vu la limitation du temps et le grand nombre de simulations.

Après avoir déterminé les propriétés du bloc et les conditions climatiques qui agissent sur le bloc, la simulation proprement dite peut être réalisée. Dans ce travail, plusieurs simulations ont été exécutées pour déterminer des conditions du confort thermique et lumineux ainsi que l'ensoleillement et la consommation énergétique d'un bloc. Les simulations du confort thermique, la consommation énergétique et l'ensoleillement sont réalisées par le logiciel ECOTECH alors que celles de la disponibilité de la lumière naturelle et le confort lumineux sont faite par le logiciel RADIANCE.

V.3 .2 Objectifs de la simulation :

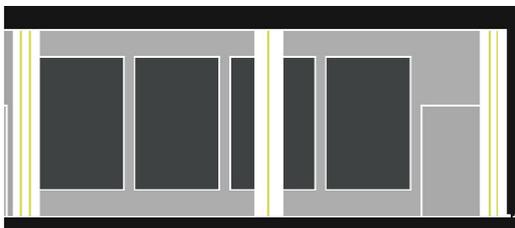
En possédant un modèle virtuel descriptif du bloc (école primaire), les données du climat et les jours typiques, un ensemble de simulations peuvent être réalisées pour obtenir des résultats des indicateurs de performance. Une fois ces résultats obtenus, nous cherchons à les analyser et ensuite les présenter sous forme de graphes qui permettent de décrire le comportement du bloc en fonction de quelques paramètres de la conception du bloc. Les graphes sont des fonctions qui relient une caractéristique de la conception du bloc à sa réponse comportementale comme la consommation d'énergie ou le confort thermique...etc. Dans cette étude, l'objectif final des simulations est, donc, l'obtention des résultats des indicateurs de performance du bloc à travers les graphes qui décrivent les comportements. Pour cela, nous devons réaliser les simulations de telle façon que les

résultats puissent être utiles pour cette fin. L'approche possible pour atteindre ces objectifs est de faire les simulations grâce à une étude paramétrique sur le modèle virtuel du bloc représentatif de la typologie choisie.

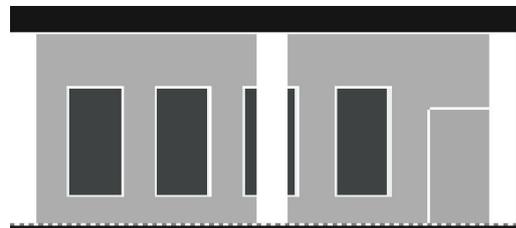
V.3 .3 Génération des alternatives (solutions architecturale):

Nous élaborons des groupes de simulations de telle façon que dans chaque groupe nous considérons seulement la variation d'un seul paramètre (par exemple, orientation du bloc), en laissant les autres paramètres constants. Néanmoins, pour isoler l'importance du paramètre choisi, il est nécessaire de considérer les autres combinaisons possibles des valeurs pour chacun des autres paramètres. Le nombre de ces combinaisons dépend du nombre de paramètres et du nombre de « pas » utilisés dans la variation de chacun d'eux. Dans ce travail, nous optons pour les choix suivants :

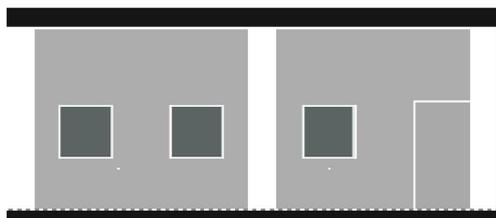
- Orientation du bloc en degré : 8 variations, c'est-à-dire, orientation de 0 à 315 degrés, avec un pas de 45 degrés (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 degrés) ; sachant que le 0 représente l'orientation sud (façade donnant sur le corridor).
- Taille des fenêtres par rapport à la façade en pourcentage (dans notre cas on a deux façade l'une donnant sur le corridor et l'autre donne sur l'extérieure) : 3 variations sont considérées 10%, 25% et 50%.



Taille de la fenetre (50%)



taille de la fenetre 25%



Taille de la fenetre 10%

- Climatisation : dans notre étude on a deux cas, celui où la climatisation est présente et celui où la climatisation est absente, c'est-à-dire, le bloc est aéré naturellement ou se dote d'équipements mécaniques de conditionnement. Pour le cas de l'aération naturelle, nous considérons les fenêtres ouvertes pendant toute la

période de l'étude alors que pour le cas de la climatisation les fenêtres restent toujours fermées.

Ces trois paramètres ont été choisis parce qu'ils font partie de quelques paramètres qu'il est possible de les connaître pendant la phase d'esquisse (avant projet). Dans ce même chapitre ont été énumérés les indicateurs de performance adoptés, au nombre de cinq : la consommation énergétique, le confort thermique des occupants, la disponibilité de lumière naturelle dans les salles de classes, le confort visuel des élève et l'ensoleillement. Chaque groupe de simulations vise donc à déterminer le comportement du bloc face à chacun de ces cinq critères (indicateurs de performance). Le nombre total de simulations nécessaire pour la détermination des indicateurs de performance du bloc est obtenu par les combinaisons possibles des valeurs pour chacun des paramètres. Sa valeur est calculée par la multiplication des nombres de variations individuelles de chaque paramètre. C'est-à-dire :

8 x 3 x 2 (Orientation X taille des fenêtres X type de climatisation) = 48 combinaisons c'est à dire 48 solutions architecturales.

Donc, 48 combinaisons (solutions architecturale) pour chaque critère fois 5 (le nombre de critères) fois 3 (le nombre des jours typiques) est égale à 720 simulations.

Après l'obtention des résultats de toutes ces simulations, on peut isoler l'influence de chacun des trois paramètres sur l'un des cinq critères. Les résultats de simulations qui décrivent le comportement du bloc prennent la forme de 30 graphes : 6 graphes pour la consommation énergétique, 6 graphes pour le confort thermique, 6 graphes pour la quantité de lumière naturelle, 6 graphes pour le confort visuel et 6 graphes pour l'exposition des salles de classes au soleil, comme décrit ci-dessous.

V.3.4 Les indicateurs de performances (critères) :

Nous avons établi comme objectif la détermination des indicateurs de performance qui décrivent le comportement du bloc et qui peuvent être utilisés pour aider à la conception d'une école primaire. Ci-dessous sont décrits les indicateurs de performances qui peuvent être obtenus en considérant les trois paramètres choisis et la façon d'obtenir les résultats nécessaires pour leur détermination avec les outils de simulation disponibles.

V.3.4.1 Critère consommation énergétique du bloc :

- l'énergie nécessaire pour climatiser (chauffage et rafraîchissement) les salles en fonction de l'orientation du bloc.
- l'énergie nécessaire pour climatiser (chauffage et rafraîchissement) les salles en fonction de la taille des fenêtres.

Ce calcul se fait par le logiciel Ecotect. Les valeurs obtenues sont en Wh, intégrées pour la période de 8 à 17 heures des trois jours typique, c'est-à-dire, l'énergie journalière consommée pour le chauffage ou le rafraîchissement pour chacun des jours typiques. Pour le cas où il n'y a pas de climatisation, autrement dit, le bloc est ventilé naturellement (fenêtres ouvertes), la valeur de cette énergie est égale à zéro. Le confort thermique ne peut ne pas être atteint dans ces conditions.

V.3.4.2 Critère confort thermique des élèves :

- le pourcentage moyen de personnes insatisfaites (PPD) dans les salles en fonction de l'orientation de bloc.
- le pourcentage moyen de personnes insatisfaites (PPD) dans les salles en fonction de la taille des fenêtres.

La détermination de l'inconfort thermique est donnée par la valeur moyenne du PPD calculée entre 8 et 17 heures des trois jours typiques de l'année scolaire. A la différence de l'énergie consommée avec la climatisation, considérer l'existence d'équipements de climatisation met à zéro la valeur de cette variable pour n'importe quelle condition de solution architecturale (PPD = 0%). Dans ce cas, le confort thermique est toujours idéal, mais, il y a une augmentation de la consommation d'énergie pour climatiser artificiellement les locaux.

V.3.4.3 Critère quantité de lumière naturelle dans les salles de classes :

- Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairement au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc ;
- Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairement au niveau du plan de travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de la taille des fenêtres.

Les valeurs de l'éclairage sont en Lux alors que le plan de travaille est considéré à 80 cm au dessus du sol. Le calcul de l'éclairage des points est réalisé par le logiciel Radiance à 10 :00 de la matinée pour trois jours typiques de l'année scolaire. Le type de ciel est considéré partiellement nuageux pour 21 décembre et éclairée pour les jours 21 Mars et 21 Mai. Les points considérés correspondent aux positions des élèves. Un total de 36 valeurs ont été analysés dans chaque classes (fig.5.5), donc un totale de 108 valeurs pour le bloc.

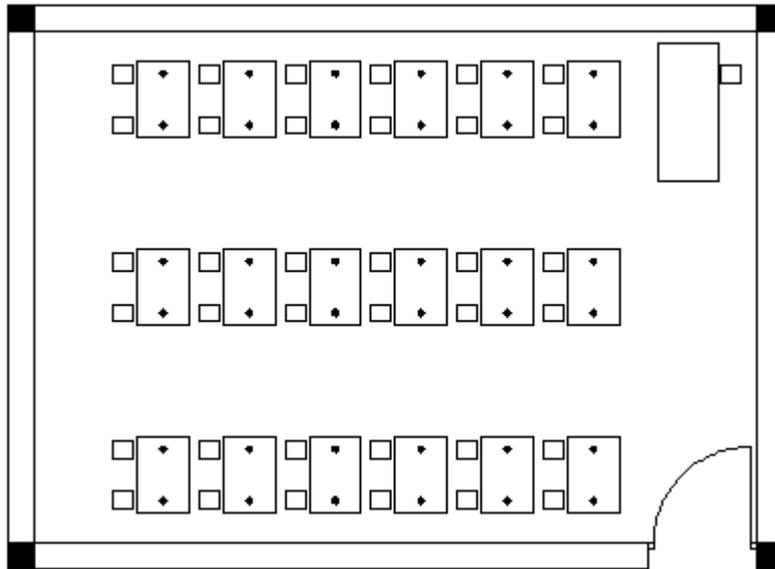


Fig.5.5 Les points considérés pour le calcul de l'éclairage au niveau du plan de travaille. Source: Auteur

V.3.4.4 Critère confort visuel des élèves:

Nous avons adopté un critère représentatif du potentiel du confort lumineux (le ratio d'uniformité d'éclairage). On doit déterminer :

- Le pourcentage (%) des points pour lesquels le ratio d'uniformité d'éclairage recommandé au niveau du plan de travaille dans les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de l'orientation du bloc
- Le pourcentage (%) des points pour lesquels le ratio d'uniformité d'éclairage recommandé au niveau du plan de travaille dans les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de la taille des fenêtres.

Le plan de travaille est considéré à 80 cm au dessus du sol. Le ratio d'uniformité est déterminé entre chaque deux points adjacents (E_{min}/E_{max}) sur le plan de travail à 10 :00 de la matinée pour trois jours typiques de l'année scolaire. Chaque ratio correspond à une

droite. Un total de 110 ratios a été calculé pour chaque classe (fig.5.6). Donc un totale de 330 ratios pour le bloc.

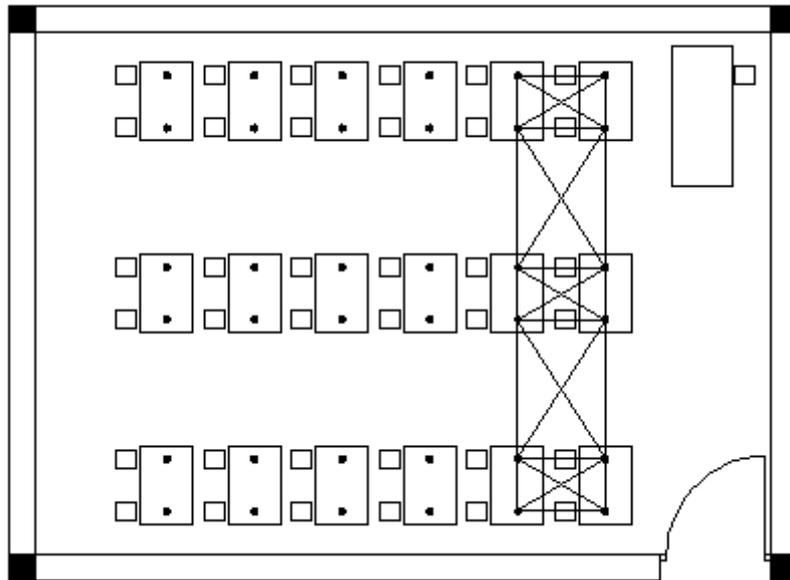


Fig.5.6 Les ratios d'uniformité au niveau du plan de travail. Source: Auteur

Une fois ces ratios obtenus, on calcule alors le pourcentage des rapports qui sont arrivés à atteindre la condition ($E_{min}/E_{max} \geq 0.8$). Cela a fourni une mesure comparative d'uniformité d'éclairage sur le plan de travail.

V.3.4.5 L'enseillement à l'intérieure des salles de classes :

- Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'enseillement > 0 en fonction de l'orientation du bloc.
- Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'enseillement > 0 en fonction de la taille des fenêtres.

Le plan de travail est considéré à 80 cm au dessus du sol. Le calcule de l'enseillement des points est réalisé par le logiciel Ecotect durant la période de 8 à 17 heures pour trois jours typiques de l'année scolaire. Un total de 320 valeurs ont été analysés pour le bloc étudié (fig.5.7).

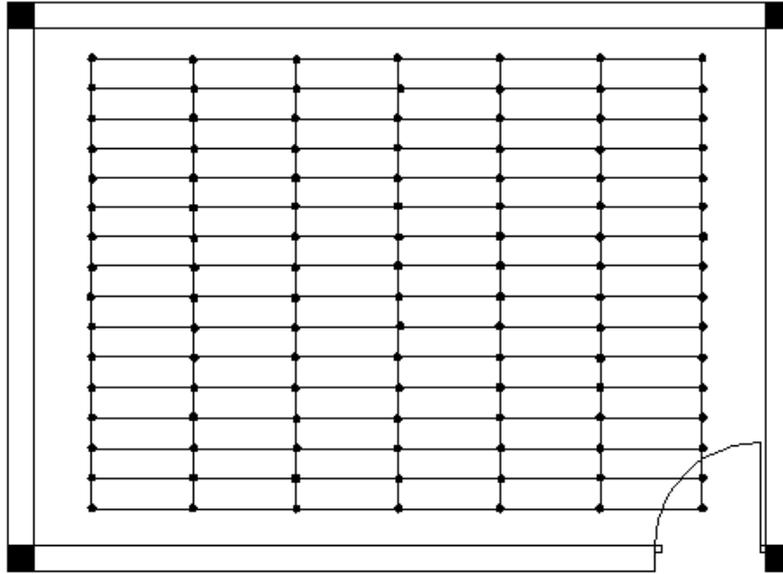


Fig.5.7 Les points considérés pour le calcul de l'ensoleillement au niveau du plan de travail. Source: Auteur

V.3.5 Détermination des graphes de performance:

La détermination des graphes de performance nécessite la recherche des tendances comportementales du bloc indépendamment des valeurs absolues obtenues de ce comportement. Il faut chercher à comprendre comment la variation d'un paramètre aura une influence sur la performance du bloc par rapport à un critère choisi, quelles que soient les valeurs considérées des autres paramètres du bloc. On répète cette procédure pour tous les paramètres pour obtenir le comportement du bloc par rapport à chacun d'eux, pour tous les critères choisis.

La meilleure façon de procéder pour la détermination des indicateurs de performance est de normaliser les résultats des simulations, de telle façon que l'importance des valeurs absolues soit éliminée. Cette normalisation est réalisée en établissant une valeur de référence pour un certain comportement et ensuite on divise les valeurs trouvées dans les simulations pour ce comportement par la valeur de référence adoptée. Un autre avantage de cette normalisation c'est le fait qu'elle rend les graphes plus clairs parce que parfois les résultats sont très proche les uns des autres et l'échelle est plus petite.

Le choix de la valeur de référence est important, puisqu'il aide, après la détermination des graphes de comportement, à obtenir quelques informations sur le comportement du bloc. Ainsi, si la valeur de référence choisie est la valeur maximale trouvée pour un certain comportement, toutes les autres valeurs normalisées fournissent la performance

concernant ce maximum, ce qui peut être très utile. Par exemple, dans l'étude de l'influence de l'orientation sur la consommation énergétique, si la valeur normalisée d'une solution architecturale quelconque est de 0.4, on en tire immédiatement l'information que cette solution présente une performance de 60% supérieure au maximum trouvé dans l'ensemble des simulations pour lesquelles on a considéré toutes les variations des orientations. Autrement dit, il y a une réduction de consommation énergétique égale à 60% car la valeur maximale normalisée qui représente la solution architecturale la plus consommatrice est égale 1. Cela transforme les graphes de comportement normalisés en un important instrument pour comprendre le comportement d'une solution architecturale choisie. Un autre avantage de normaliser par la valeur maximale, c'est le fait que, pour le même critère, les valeurs maximales normalisées de plusieurs graphes (correspondant aux variations de divers paramètres), représentent la solution architecturale qui présente la meilleure ou la mauvaise performance tout dépend du critère. Si le critère est à maximiser (par exemple la disponibilité de la lumière naturelle), la valeur maximale normalisée représente la meilleure performance tandis que si le critère est à minimiser (par exemple l'inconfort thermique mesuré par le pourcentage moyen des personnes insatisfaites), elle représente la mauvaise performance.

En suivant le tableau 5.1 présenté ci-dessus, on résume le processus de la détermination des 30 graphes du comportement comme suit :

1. On choisit un certain paramètre et un certain critère ;
2. On établit un tableau dans lequel chaque ligne contient les valeurs obtenues par des simulations pour les diverses variations du paramètre ;
3. Pour chaque ligne du tableau, on prend la valeur maximale et on normalise tous les autres résultats par rapport à elle ;
4. On ajuste un graphe aux valeurs normalisées de toutes les lignes du tableau, par rapport aux variations du paramètre.

valeurs absolues du comportement				valeurs normalisées du comportement				Graphe du comportement
variation du paramètre P				variations du paramètre P				
P=1	P=2	P=3	P=4	P=1	P=2	P=3	P=4	
valeur 1	valeur 2	valeur 3	valeur 4	1	0,8	0,5	0,25	
valeur 1	valeur 2	valeur 3	valeur 4	1	0,8	0,5	0,25	
valeur 1	valeur 2	valeur 3	valeur 4	1	0,8	0,5	0,25	
valeur 1	valeur 2	valeur 3	valeur 4	1	0,8	0,5	0,25	

tableau.5.1 Détermination des indicateurs de performance. Source: Auteur

V.4 Application de l'Analyse Multicritère : La méthode « SAW »

Par l'utilisation des cinq critères cités ci-dessous (tableau 5.2)

Critères	Explication
C1	Lumière naturelle (Eclairage)
C2	Confort visuel (Uniformité d'éclairage)
C3	Confort thermique (PPD)
C4	Consommation énergétique
C5	Ensoleillement

Tableau 5.2 Les critères pris en considération dans notre recherche. Source : Auteur

On veut choisir parmi des solutions architecturales laquelle qui répond au mieux à tous les critères mentionnés ci-dessus, c'est-à-dire, la solution optimale. Les résultats des simulations servent comme une base de données pour plusieurs solutions architecturales (alternatives). La solution architecturale 1 qui présente une orientation de 45°, possède une taille de fenêtres dont la proportion est de 10 (%) par rapport au mur de la façade et se dote d'une climatisation aura une valeur V1C1 pour le critère (C1), une valeur V1C2 pour le critère (C2), une valeur V1C3 pour le critère (C3), une valeur V1C4 pour le critère (C4) et une valeur V1C5 pour le critère (C5) pendant le jour de 21 Décembre par exemple. La même typologie architecturale mais présentant une orientation différente par exemple 90°, possédant une taille de fenêtres égale à 10% et doté d'une climatisation aura une valeur V2C1 pour le critère (C1), une valeur V2C2 pour le critère (C2), une valeur V2C3 pour le critère (C3), une valeur V2C4 pour le critère (C4) et une valeur V2C5 pour le critère (C5). (Voir fig.5.8). Par la même procédure, on représente les valeurs de 48 solutions architecturales (résultante de 8 x 3 x 2 c'est-à-dire, l'orientation x la taille des fenêtres x le type de climatisation) sous forme d'un tableau. (Voir tableau 5.3).

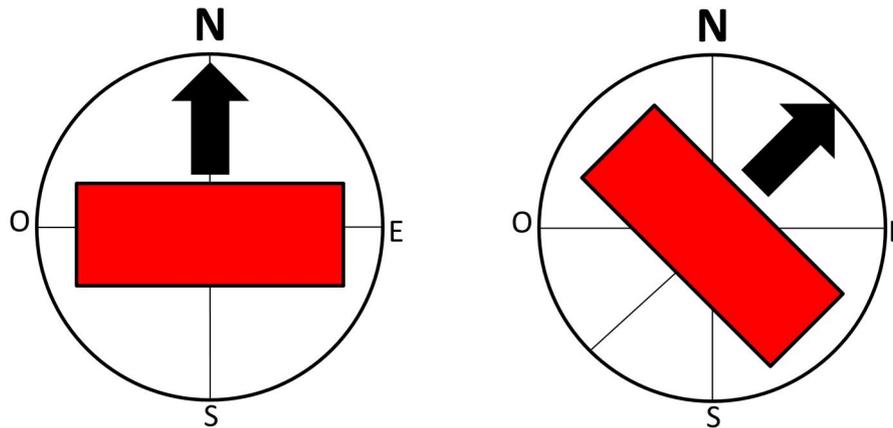


Fig.5.8 Deux solutions architecturales (alternatives) du bloc. Source : Auteur

Solutions	OR	TF	CL	C1	C2	C4	C3	C5
solution 1	0	50	Oui	V1C1	V1C2	V1C3	V1C4	V1C5
solution 2	90	50	Non	V2C1	V2C2	V2C3	V2C4	V2C5
solution 3	45	25	Oui	V3C1	V3C2	V3C3	V3C4	V3C5
solution n	n	n	n	VnC1	VnC2	VnC3	VnC4	VnC5
Solution 48	0	10	Oui	V48C1	V48C2	V48C3	V48C4	V48C5

Tableau 5.3 Résultats de simulation pour les différentes solutions architecturales. Source : Auteur

Les étapes de la méthode SAW se déroulent comme suit :

Etape 1 :

- Construire une matrice de comparaison par paires ($n \times n$) des critères par rapport à l'objectif en employant l'échelle 1-9 de comparaison binaire de Saaty. En d'autres termes, elle est employée pour comparer chaque critère avec les autres critères, un par un. Pour chaque comparaison, on décide lequel des deux critères est le plus important, et puis on assigne un score à ce critère pour montrer à quel point il est important par rapport à l'autre critère. Quant à la matrice de comparaison binaire (voir fig.5.9) alors que pour l'échelle 1-9 de comparaison binaire de Saaty, voir le tableau 5.4.

Intensité de l'importance	Définition	Explication
1	importance égale	Deux activités contribuent également à l'objectif
2	Faible ou léger	
3	Importance modérée	Le jugement favorise légèrement une activité par rapport à une autre
4	Modérée +	
5	Importance forte	le jugement favorise fortement une activité par rapport à une autre
6	Forte +	
7	Très fort	Une activité est favorisée très fortement par rapport à une autre
8	Très, très fort	
9	Importance extrême	L'évidence favorisant une activité par rapport à autres est de l'ordre le plus élevé possible de l'affirmation

Tableau 5.4 échelle 1.9 de Saaty (1980)

$$\begin{matrix}
 & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\
 C_1 & \left[\begin{matrix} w_1 / w_1 & w_1 / w_2 & \dots & w_1 / w_n \end{matrix} \right. \\
 C_2 & \left. \begin{matrix} w_2 / w_1 & w_2 / w_2 & \dots & w_2 / w_n \end{matrix} \right. \\
 \vdots & \left. \begin{matrix} \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix} \right. \\
 C_n & \left. \begin{matrix} w_n / w_1 & w_n / w_2 & \dots & w_n / w_n \end{matrix} \right]
 \end{matrix}$$

Fig.5.9 La matrice de comparaison

- Calculer chaque élément de la matrice de comparaison par le total de sa colonne et calculer le vecteur de priorité en trouvant les moyennes de rangées.
- La matrice de la somme pondérée est le résultat de la multiplication de la matrice de comparaison binaire et le vecteur de priorité.
- diviser tous les éléments de la matrice de la somme pondéré par leurs vecteurs de priorité respectifs pour trouver les vecteurs de cohérences.
- Calculer la moyenne de cette valeur pour obtenir λ max.
- Une fois cette première comparaison faite. Il est nécessaire de vérifier la cohérence de cette comparaison. Saaty (1990) a proposé un index de cohérence (C.I.) et un ratio de conférence (C.R.) pour vérifier la cohérence de la matrice de comparaison. En d'autres termes, il est important de vérifier si le décideur était cohérent dans ses jugements (c.-à-d., à quel point la transformation des variables qualitatives en variables quantitatives est précise). Pour cela, CI (index de cohérence) est calculé. La formule est décrite comme suit :

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

- CI est l'index de cohérence , λ_{\max} c'est la plus grande valeur, n est l'ordre de la matrice (la taille de la matrice $n \times n$). Saaty recommande de ne pas comparer trop d'éléments. Il stipule que cette méthode puisse fonctionner raisonnablement avec une matrice 8×8 . Cela signifie que la plus grande valeur λ_{\max} ne devrait pas être plus grande que 8. CI devrait être moins de 10% pour qu'on puisse dire que les comparaisons sont cohérentes. Si CI est plus grand que 10%, cela signifie que les comparaisons ne sont pas cohérentes et le décideur devrait refaire les comparaisons.¹
- Calculer le ratio de cohérence CR, comme suit :

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

RI est le « random index ». Il est calculé par rapport à la taille de la matrice (voir tableau 5.5)

Taille de la matrice	Random index (RI)
1	0
2	0
3	0.58
4	0.9
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

Tableau 5.5 Random index. Source : Saaty (1980)

Etape 2:

Construire la matrice de décision ($m \times n$) qui incluent les solutions architecturales « m » et les critères « n ». Calculer la matrice de décision normalisée par les formules suivantes:

$$X_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^{\min}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}} \dots\dots\dots \text{pour les critères maximisés} \dots\dots\dots (1)$$

$$X_{ij} = \frac{a_j^{\max} - a_{ij}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}} \dots\dots\dots \text{Pour les critères minimisés} \dots\dots\dots (2)$$

¹ Machado. R et al, “The use of a mathematical multi-criteria decision-making model for Selecting the fire origin room”, *Building and Environment* 43, 2008, 2090–2100.

Etape 3:

Evaluer chaque alternative (solution architecturale) par la formule suivante:

$$S_{SAW} = \max_j \sum_{i=1}^m x_{ij} \times w_i, \quad j = 1, \dots, n.$$

w_i : le poids du critère

S_{SAW} le score final d'une alternative

n est le nombre des critères

x_{ij} est la valeur normalisée

La demarche générale de l'application de la méthode est présenté dans la fig. 5.10

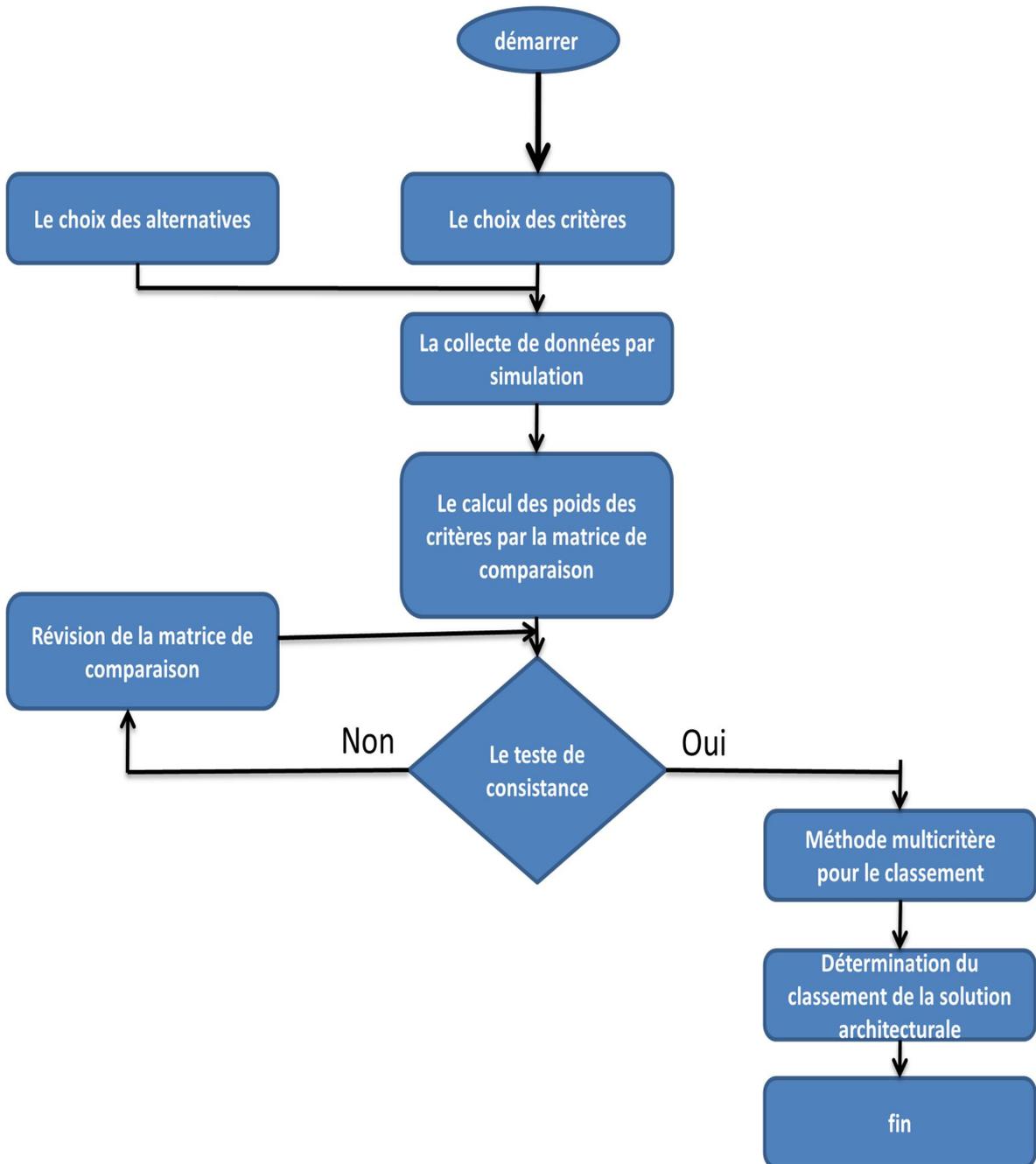


Fig.5.10 Démarche détaillée de notre approche. Source : Auteur

V.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, un bloc d'une école primaire de forme rectangulaire dans la ville de Biskra a été retenu comme un cas d'étude après une analyse typologique. Il était possible aussi de faire ressortir les dimensions et les indicateurs qui pouvaient être mesurables par la simulation. Ces indicateurs font partie de beaucoup de facteurs intervenants dans la phase de l'esquisse dont l'impact est très important pendant tout le cycle de vie du projet architecturale. Les résultats de simulation seraient employés comme des inputs pour l'application de la méthode multicritère choisie.

Cependant , le modèle d'analyse a des lacunes. La méthode se veut très globale pour incarner l'approche holistique de la conception architecturale mais vu le temps limité et le nombre des simulations on a choisi seulement cinq critères qui ont un impact considérable sur le processus de l'apprentissage de l'élève à savoir : la quantité de la lumière naturelle, le confort visuel, le confort thermique, l'ensoleillement et la consommation énergétique

Dans le prochain chapitre on allait présenter les résultats de simulation accompagnés de graphes ainsi que l'application en détail de la méthode SAW pour trouver la solution optimale

Chapitre six

Résultats de simulations et application de la méthode multicritère

VI.1 Introduction :

A partir de la démarche décrite dans chapitre précédent, on va procéder aux différentes simulations, on obtiendra les différentes valeurs normalisées (pour voir les valeurs brutes consultez l'annexe) relatives à l'éclairement en lux, les indices d'informaté, l'inconfort thermique en termes de PPD, l'ensoleillement en kWh/h et la consommation énergétique. On présente d'abord, les graphes de performances relatifs aux critères pris en considération puis on les analyse. L'étude paramétrique fournit les solutions architecturales (alternatives). Les résultats des solutions architecturales obtenus seront intégrées à la méthode SAW pour avoir l'évaluation finale de chaque solutions et puis un classement est fait .Des conclusions seront tirées des résultats obtenus.

VI.2 Lumière naturelle (Eclairage) :

VI.2.1 (21Mai) :

✓ Impact de l'orientation :

TF	Orientation									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360	
50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25%	1	0,714	0,535	0,607	0,5	0	0	0,357	1	
10%	0,482	0,482	0,464	0,571	0,553	0,803	1	0,517	0,482	

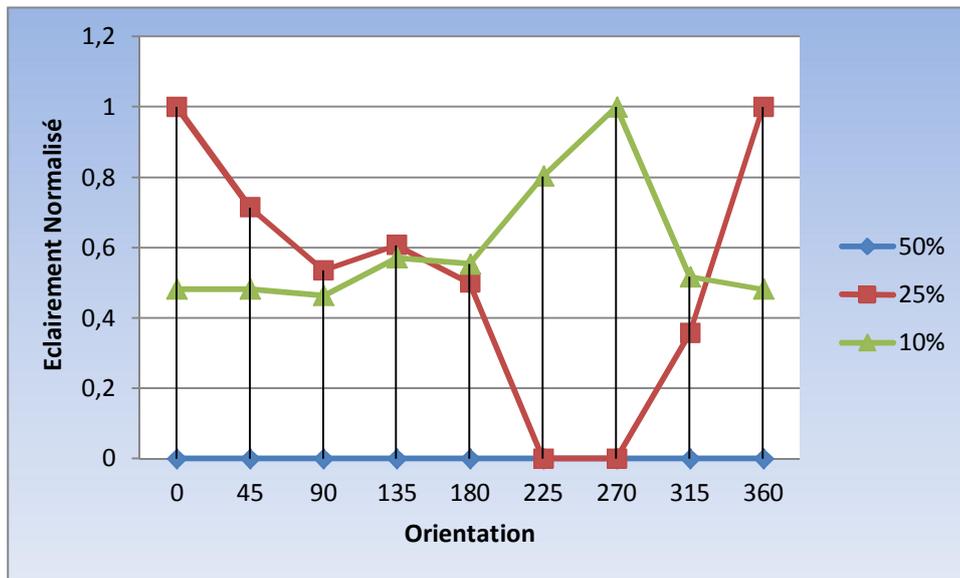


Fig.6.1 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairage au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mai.

Source : Auteur

D'après la figure (6.1) on remarque que le bloc ayant 50 % de taille de fenêtre par rapport à la surface de la façade présente le mauvais indicateur de performance qui est égale à 0 pour toutes les orientations par ce que toutes les valeurs d'éclairage sont au-dessus de l'éclairage recommandé (300-500 lux) .Pour le bloc ayant une proportion d'ouvertures égale à 25% par rapport à la surface de la façade la meilleure performance est enregistrée par l'orientation Sud suivie par l'orientation Sud-est alors que les orientations Nord-ouest et Ouest présente le mauvais indicateur de performance . D'ailleurs l'écart de performance entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise atteint 100 %. Pour le bloc ayant une proportion d'ouvertures égale à 10 % par rapport à la surface de la façade la meilleure performance est enregistrée par l'orientation Ouest suivie par l'orientation Nord-Ouest alors que le mauvais indicateur de performance est trouvé dans le bloc orienté Est suivi par

les blocs orientés Sud et Sud-est. L'écart de performance entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise est égal à 54%.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360	
50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25%	1	0,74	0,576	0,531	0,451	0	0	0,344	1	
10%	0,964	1	1	1	1	1	1	1	0,964	

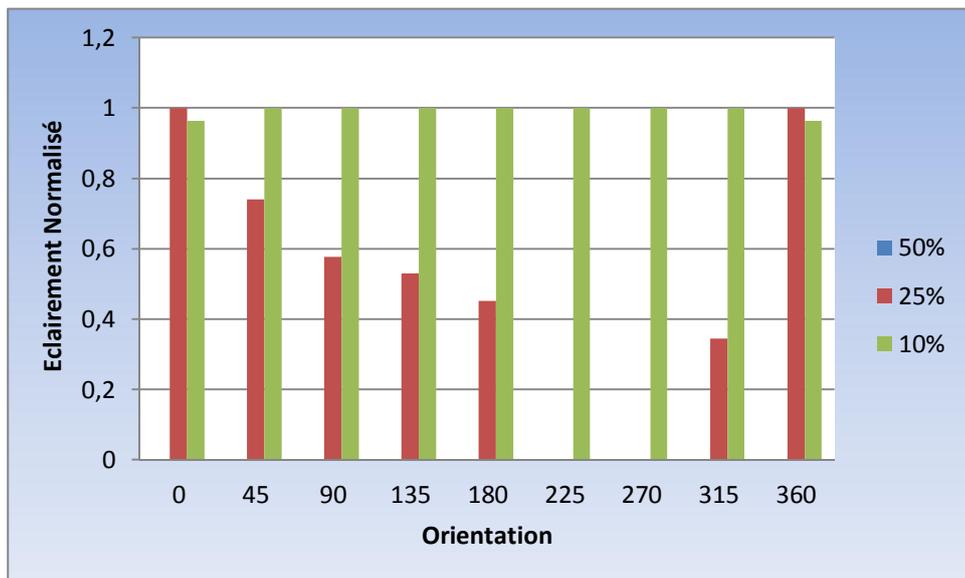


Fig.6.2 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairage au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de la taille des fenêtres durant le 21 Mai.
Source : Auteur

Selon la figure (6.2) on perçoit que le pourcentage des points dont la valeur de l'éclairage tombe dans l'écart de l'éclairage recommandé pour les salles de classes (300-500 lux) baisse à mesure que la taille des ouvertures augmente. Le meilleur indicateur de performance est obtenu par le bloc dont la taille de la fenêtre est de 10% pour la plupart des orientations sauf pour l'orientation Sud ou le bloc dont la taille de la fenêtre est de 25% a dépassé légèrement celui dont la taille de la fenêtre est de 10% tandis que le mauvais indicateur de performance est obtenu par le bloc ayant une proportion des ouvertures égale à 50%. La différence entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise en terme de performance est égale à 100% ce qui signifie que la taille de la fenêtre a un grand impact sur la quantité et la qualité de la lumière.

VI.2.2 (21Decembre) :

✓ Impact de l'orientation :

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,29	0	0,387	0,709	0	0	0,483	1	0,29
25%	1	0,857	0,982	0,625	0,982	0,857	0,767	0,875	1
10%	1	0,23	0,615	0,769	1	0,846	0,307	0,076	1

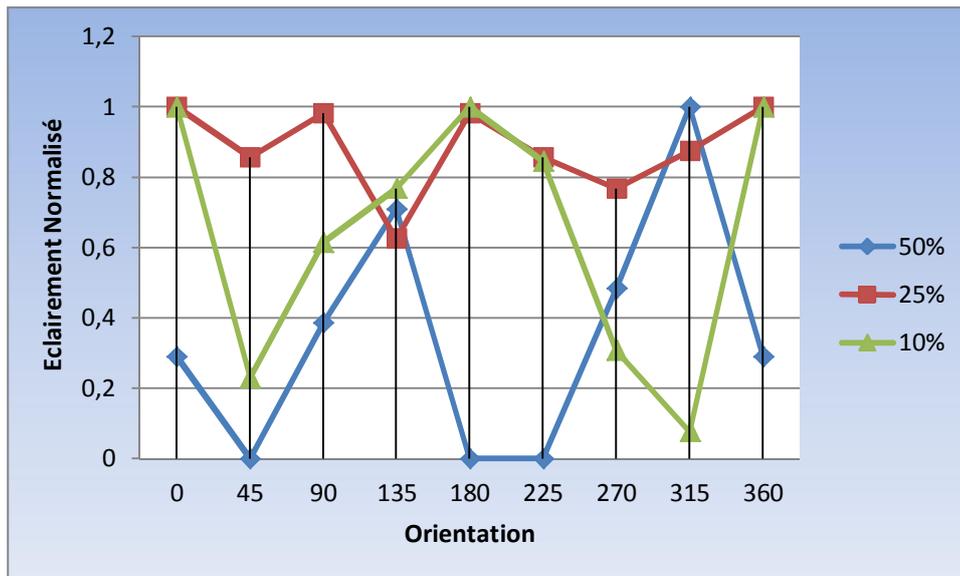


Fig.6.3 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairage au niveau du plan du travaille dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21Decembre.
Source : Auteur

On voit d'après la figure (6.3) que le bloc ayant 50 % de taille de fenêtre par rapport à la surface de la façade l'orientation Sud-ouest présente la meilleur solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 1 suivie par l'orientation Nord-est avec un dicteur de performance égale à 0,7 alors que les orientation Sud-est, Nord et Nord-ouest présente la mauvaise solution architecturale avec un indice de performance égale à 0 et par conséquence l'écart de performance entre la meilleur solution et la mauvaise est égale à 100 % .

Pour le blocs ayant une proportion d'ouvertures égale 25% par rapport à la surface de la façade la meilleure performance est enregistré par l'orientation Sud avec un indicateur égale à 1 suivie par les orientation Est et Nord mais avec une différence légère alors que l'orientations Nord-est présente le mauvais indicateur de performance égale 0,62 . L'écart de performance entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise parvient à 38%.

Pour le blocs ayant une proportion d'ouvertures égale 10 % par rapport à la surface de la façade la meilleure performance est enregistré par les orientation Nord et Sud avec un indice égale à 1 suivie par l'orientation Nord-Ouest avec un indicateur égale à 0,84 alors que le mauvais indicateur de performance est trouvé dans le bloc orienté Sud-ouest avec un indicateur égale à 0,07 suivie par le bloc orienté Sud-est avec un indice égale à 0,23. L'écart de performance entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise est égal à 93%.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,16	0	0,218	0,628	0	0	0,348	0,632	0,16
25%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10%	0,232	0,0625	0,145	0,285	0,236	0,229	0,093	0,020	0,232

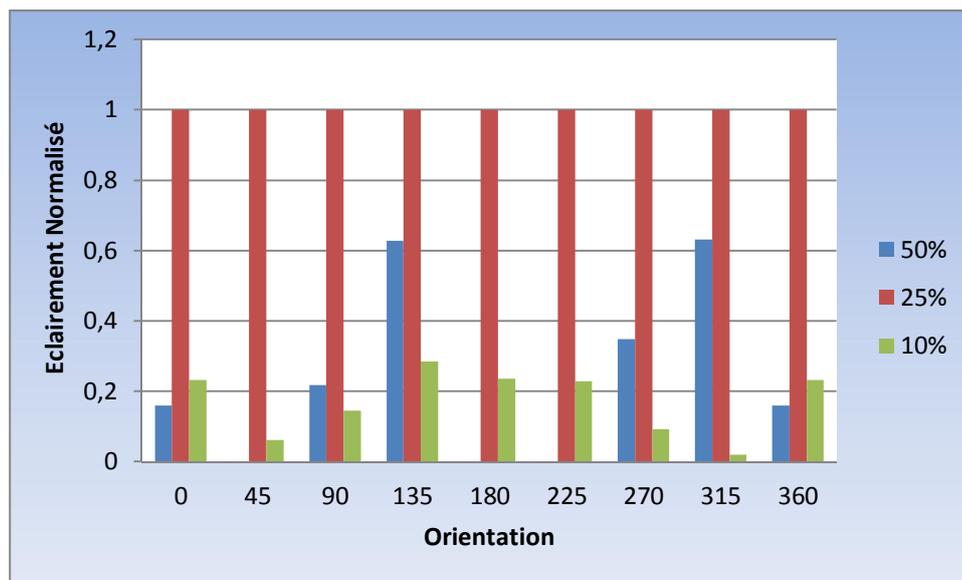


Fig.6.4 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairage au niveau du plan du travaille dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Décembre.
Source : Auteur

On remarque selon la figure (6.4) que le pourcentage des points dont la valeur de l'éclairage qui correspond à l'écart de l'éclairage recommandé pour les salles de classes (300-500 lux) baisse à mesure que la taille des ouvertures augmente. Le meilleure indicateur de performance est obtenu par le bloc dont la taille de la fenêtre est de 25 % pour la plus part des orientations tandis que le mauvais indicateur de performance est obtenu par le bloc ayant une proportion des ouvertures égale à 50% pour les orientations

Sud , Sud-est, Nord et Nord-ouest et le bloc ayant une proportion des ouvertures égal à 10% pour les orientations Est, Nord-est, Ouest et Sud-ouest. La différence entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise en termes de performance est égale à 98%.

VI.2.3 (21Mars) :

✓ **Impact de l'orientation :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25%	0,66	0	0,113	0,886	0	0	0	1	0,66
10%	0,393	0,909	0,424	0,272	0,378	1	0,681	0,303	0,393

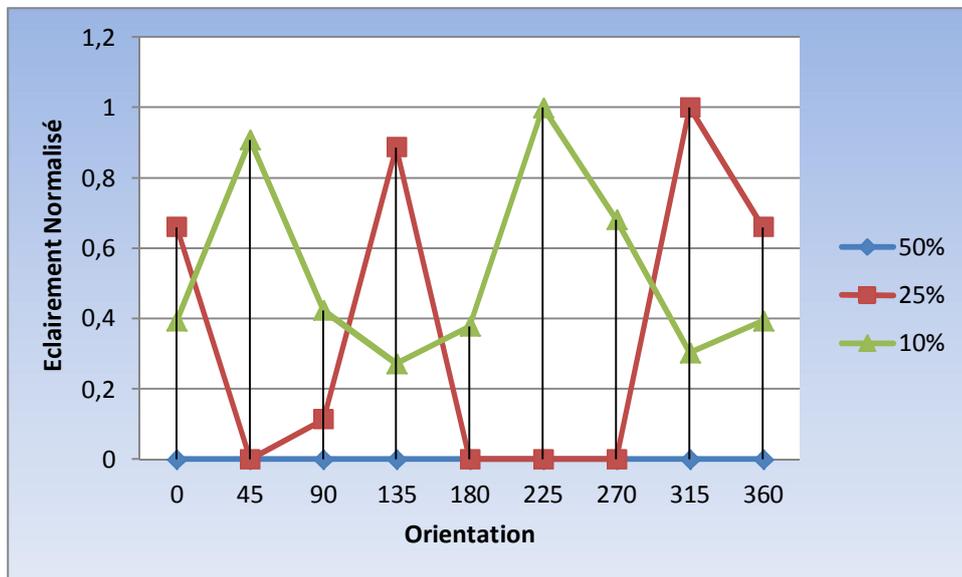


Fig.6.5 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairage au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars.
Source : Auteur

D'après la figure (6.5) On remarque que le bloc ayant 50 % de taille de fenêtre par rapport à la surface de la façade présente la mauvaise solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 0 pour toutes les orientations par ce que toutes les valeurs d'éclairage sont au-dessus de l'éclairage recommandé (300-500 lux) .

Pour les blocs ayant une proportion d'ouvertures égale 25% par rapport à la surface de la façade l'orientation Sud-ouest présente la meilleure solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 1 l'orientation suivie par l'orientation Nord-est et Sud qui parvient à des indicateurs de performance égale à 0,88 et 0,66 alors que les orientations Ouest, Nord-ouest, Nord et Sud-est présentent les mauvaises solutions architecturale avec

un indicateur de performance égale à 0. L'écart de performance entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise parvient à 100%.

Pour les blocs ayant une proportion d'ouvertures égale 10 % par rapport à la surface de la façade l'orientation Nord-ouest présente la meilleure solution architecturale avec un indicateur égale à 1 suivie par l'orientation Sud-est avec un indicateur de performance égale à 0,9 alors que l'orientation Nord-est présente la mauvaise solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 0,27 suivi par l'orientation Sud-ouest avec un indicateur de performance égale à 0,3. L'écart de performance entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise est égal à 73%.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360	
50%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25%	1	0	0,214	1	0	0	0	1	1	
10%	0,742	1	1	0,382	1	1	1	0,377	0,742	

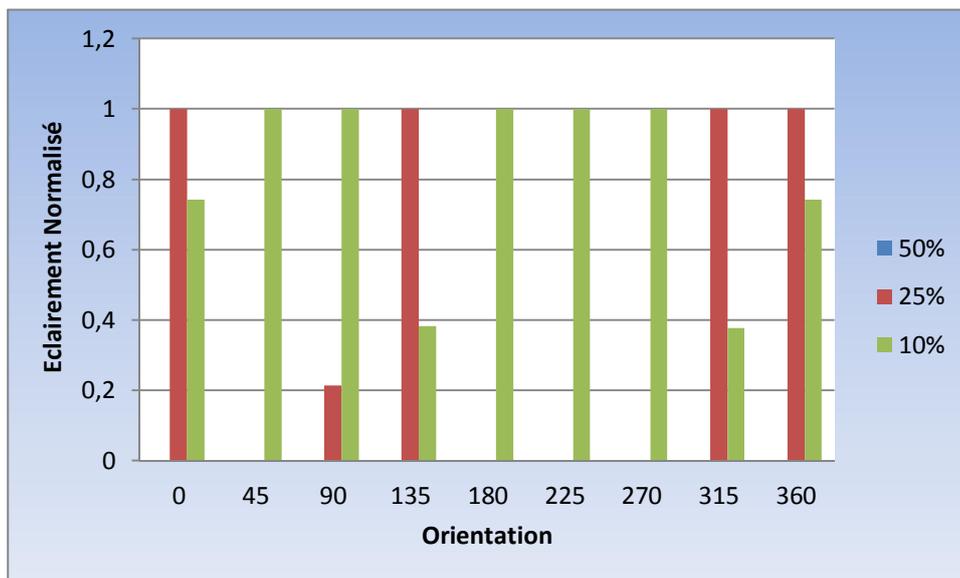


Fig.6.6 Le Pourcentage (%) des points calculés pour lesquels l'éclairage au niveau du plan du travail dans les salles de classes $300 \leq E \leq 500$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars.

Source : Auteur

La figure (6.6) montre le comportement du bloc en termes de pourcentage d'éclairage recommandé par rapport à la taille des ouvertures. Une proportion de taille de fenêtre égale à 50% présente la mauvaise solution architecturale pour toutes les orientations avec un indicateur de performance égale à 0 alors que le meilleur indicateur de performance est

obtenu par le bloc dont la taille de la fenêtre est de 10% pour la plus part des orientations sauf pour l'orientation Sud, Nord-est et Sud-ouest et le bloc dont la taille de la fenêtre est de 25% pour les orientations Sud, Nord-est et Sud .La différence entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise en terme de performance est égale à 100%.

VI.3 Confort visuel (Uniformité d'éclairément) :

VI.3.1 (21Mai) :

✓ **Impact de l'orientation :**

TF	Orientation									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360	
50%	0,965	0,965	0,972	1	0,916	0,733	0,733	0,848	0,965	
25%	0,985	0,981	0,952	1	0,922	0,812	0,863	0,911	0,985	
10%	0,855	0,86	0,845	0,815	0,776	1	0,98	0,855	0,855	

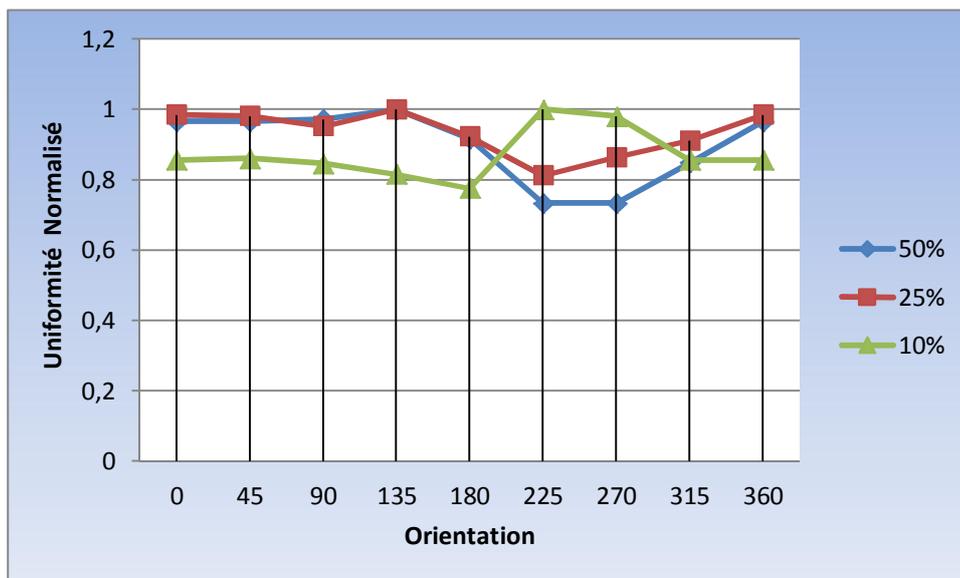


Fig.6.7 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travaille pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mai. Source : Auteur

Sur la figure (6.7) les blocs ayant une proportion de 25 % et 50% de taille de fenêtre par rapport à la surface de la façade présentent suivent le même comportement ou l'orientations Nord-est présente la meilleur solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 1 pour les deux solutions alors que l'orientation Nord-ouest présente la mauvaise solution avec un dicteur de performance égale à 0,81 et 0,73 respectivement ; cette orientation au contraire présente la meilleur solution pour le bloc ayant une taille des ouvertures égale à 10% avec un indicateur égale à 1 tandis que l'orientation Nord présente

la mauvaise solution avec un indicateur de performance égale à 0,77. L'écart de performance entre la meilleure solution et la mauvaise est égal à 27%, 19% et 23% pour les blocs ayant des tailles des ouvertures égales à 50%, 25% et 10% respectivement.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,858	0,855	0,824	0,842	0,847	0,932	0,991	0,905	0,858
10%	0,551	0,554	0,541	0,507	0,527	0,848	0,831	0,627	0,551

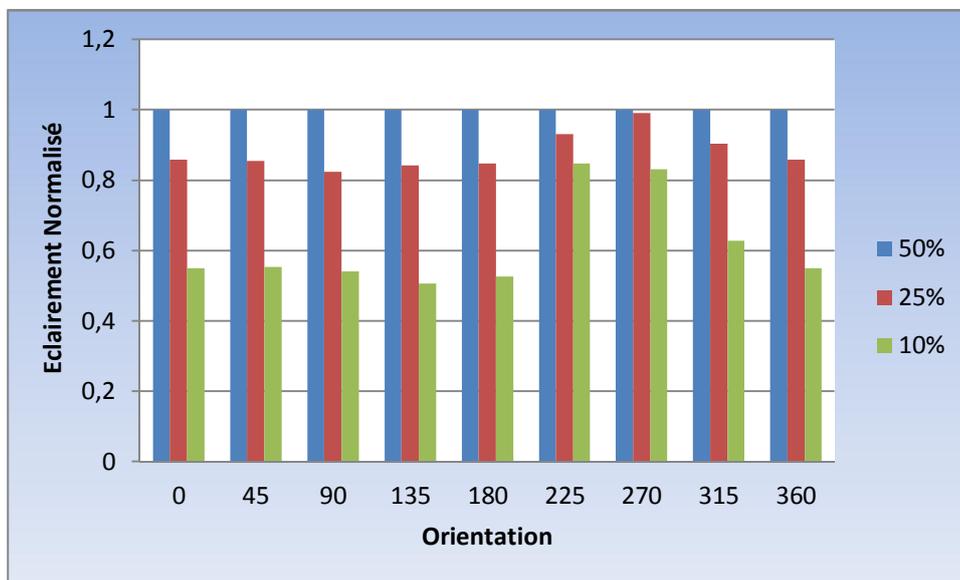


Fig.6.8 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de la taille des ouvertures durant le 21Mai. Source : Auteur

Selon la figure (6.8) le pourcentage des points dont la valeur de l'uniformité correspond à la valeur recommandée pour la salle de classe ($\geq 0,8$) augmente à mesure que la taille des ouvertures augmente. Le bloc dont la taille de la fenêtre est de 50 % présente la meilleure solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 1 pour toutes les orientations tandis que le mauvais indicateur de performance est obtenu par le bloc ayant une proportion des ouvertures égale à 10 %. La différence entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise en termes de performance est égale à 50% pour l'orientation Nord-est.

VI.3.2 (21 Décembre) :

✓ Impact de l'orientation :

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,869	0,963	0,898	1	0,902	0,943	1	0,995	0,869
25%	0,851	0,80	0,796	1	0,935	0,745	0,921	0,828	0,851
10%	0,687	0,897	0,63	0,681	0,920	1	0,784	0,698	0,687

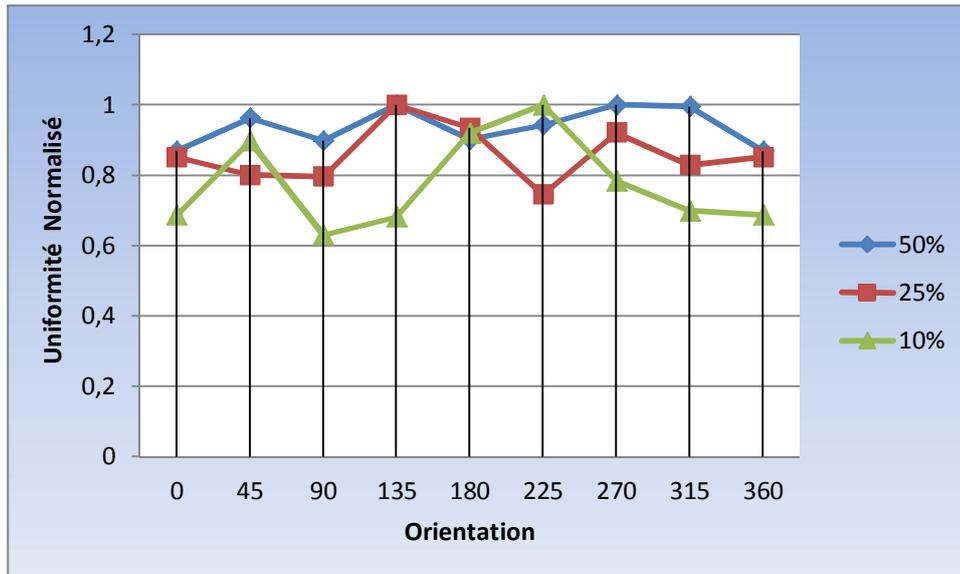


Fig.6.9 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Décembre. Source : Auteur

On se rend compte d'après la figure (6.9) que pour le jour de 21 Décembre les blocs ayant une proportion de 25 % et 50% de taille de fenêtre par rapport à la surface de la façade présentent suivent le même comportement comme le cas du mois précédent (21Mai). L'orientation Nord-est présente la meilleure solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 1 pour les deux solutions alors que l'orientation Sud pour le bloc ayant 50% de taille d'ouverture et l'orientation Nord-ouest pour le bloc ayant une proportion de taille d'ouverture de 25% présentent les mauvaises solutions architecturales avec des indicateurs de performance égale à 0,86 et 0,74 respectivement.

Pour le bloc ayant une taille des ouvertures égale à 10% l'orientation Nord-ouest présente la meilleur solution pour avec un indicateur égale à 1 tandis que l'orientation Est présente la mauvaise solution avec un indicateur de performance égal à 0,63. L'écart de performance entre la meilleure solution et la mauvaise est égal à 14%, 26% et 37% pour les blocs ayant des tailles des ouvertures égales à 50%, 25% et 10% respectivement.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,859	0,729	0,778	0,878	0,909	0,693	0,808	0,73	0,859
10%	0,565	0,666	0,502	0,487	0,729	0,758	0,560	0,502	0,565

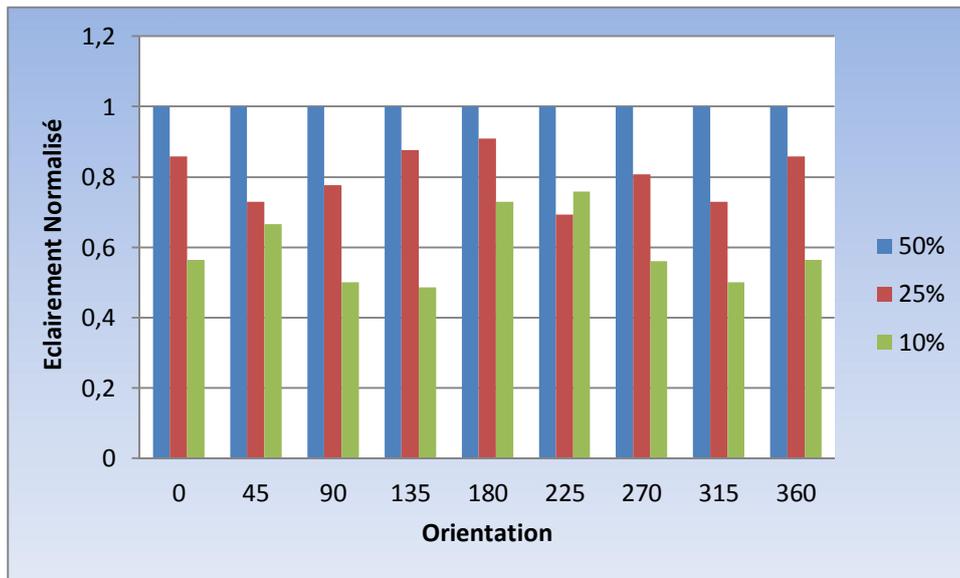


Fig.6.10 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travaille pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de la taille des ouvertures durant le 21Décembre.
Source : Auteur

Le graphe (6.10) montre que le pourcentage des points dont la valeur de l'uniformité correspond à la valeur recommandée pour les salles de classe ($\geq 0,7$) augmente dans la mesure de l'augmentation de la taille des ouvertures. Le bloc dont la taille de la fenêtre est de 50 % présente la meilleure solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 1 pour toutes les orientations tandis que le mauvais indicateur de performance est obtenu par le bloc ayant une proportion des ouvertures égale à 10% pour toutes les orientation sauf pour l'orientation Nord-ouest ou le bloc ayant une taille des ouvertures égale à 25% présente le mauvais indicateur de performance . La plus grande différence entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise en termes de performance est égale à 52%, ce dernier est enregistré avec Nord-est.

VI.3.3 21 Mars :

✓ Impact de l'orientation :

TF	Orientation									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360	
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,859	0,729	0,778	0,878	0,909	0,693	0,808	0,73	0,859	
10%	0,565	0,666	0,502	0,487	0,729	0,758	0,560	0,502	0,565	

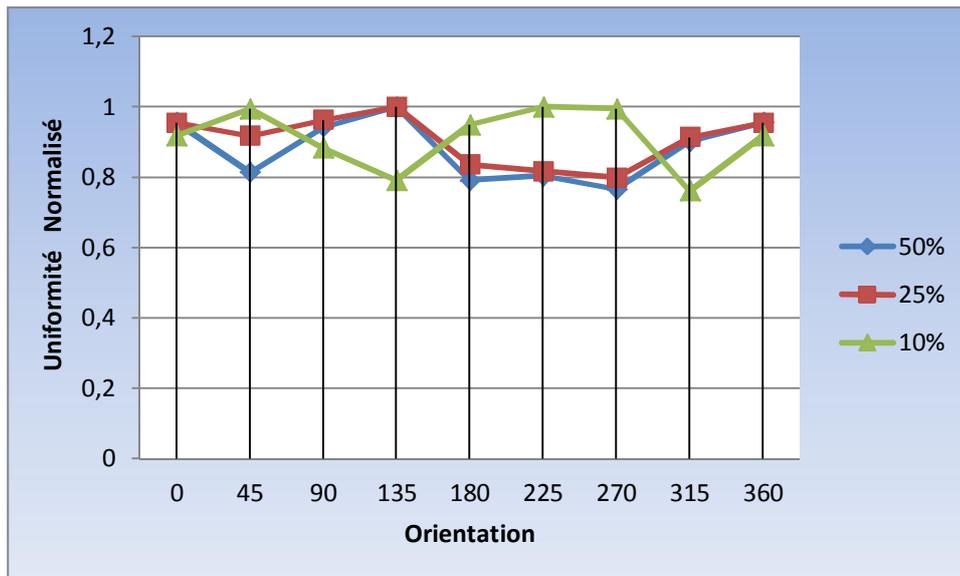


Fig.6.11 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur

On remarque d'après la figure (6.11) pour le jour de 21 Mars que les blocs ayant une proportion de 25 % et 50% de taille de fenêtre par rapport à la surface de la façade suivent le même comportement comme le cas des deux mois précédent (21Mai, 21décembre). L'orientation Nord-est présente la meilleure solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 1 pour les deux solutions alors que l'orientation Ouest présente la mauvaise solution architecturale avec des indicateurs de performance égale à 0,76 et 0,79 respectivement.

Pour une le bloc ayant une taille des ouvertures égale à 10% l'orientation Nord-ouest présente la meilleur solution pour avec un indicateur égale à 1 tandis que l'orientation Sud-ouest présente la mauvaise solution avec un indicateur de performance égale à 0,76. L'écart de performance entre la meilleure solution et la mauvaise est égal à 24%, 21% et 24% pour les blocs ayant des tailles des ouvertures égales à 50%, 25% et 10% respectivement.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,844	0,953	0,862	0,845	0,892	0,858	0,88	0,856	0,844
10%	0,597	0,759	0,581	0,492	0,745	0,772	0,806	0,524	0,597

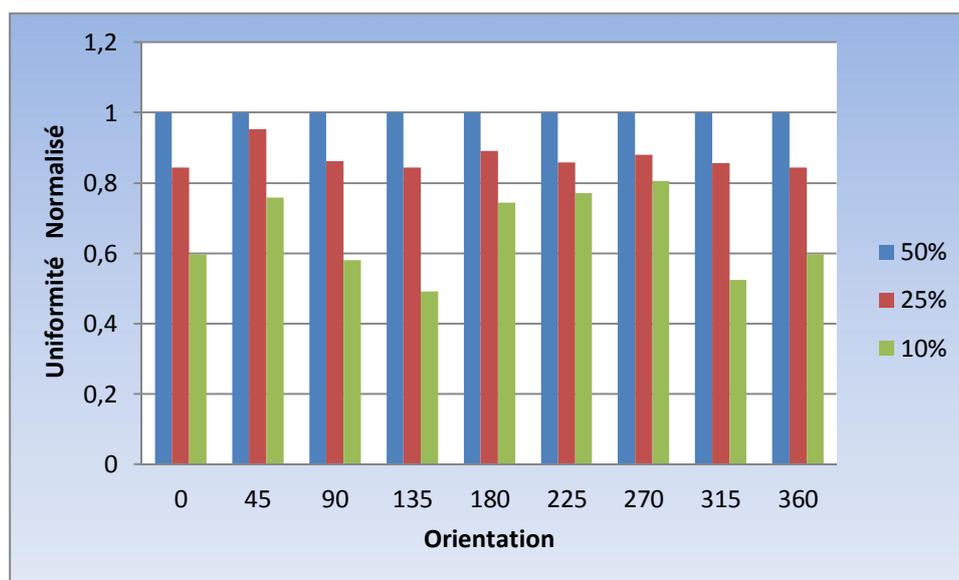


Fig.6.12 Le pourcentage (%) des points auxquels le ratio d'uniformité au niveau du plan de travail pour les salles de classes $\geq 0,8$ en fonction de la taille des ouvertures durant le 21 Mars. Source : Auteur

La figure (6.12) montre que le pourcentage des points dont la valeur de l'uniformité correspond à la valeur recommandée pour les salles de classe ($\geq 0,7$) en 21 Mars augmente à mesure que la taille des ouvertures augmente en suivant le même comportement des deux jours typiques précédents (21 Mai et 21 Décembre). Le bloc dont la taille de la fenêtre est de 50 % présente la meilleure solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 1 pour toutes les orientations tandis que le mauvais indicateur de performance est obtenu par le bloc ayant une proportion des ouvertures égale à 10% pour toutes les orientations. Le bloc dont la taille des ouvertures est 25% présente des performances moyennes. La plus grande différence entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise en termes de performance est égale à 51%. Cet écart est enregistré avec Nord-est.

VI.4 Consommation énergétique :

VI.4.1 (21 Mai) :

✓ Impact de l'orientation

TF	Orientation									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360	
50%	0,87	0,95	1	0,95	0,87	0,94	0,99	0,95	0,87	
25%	0,90	0,96	1	0,96	0,90	0,96	0,99	0,96	0,90	
10%	0,94	0,98	1	0,98	0,94	0,97	0,99	0,98	0,94	

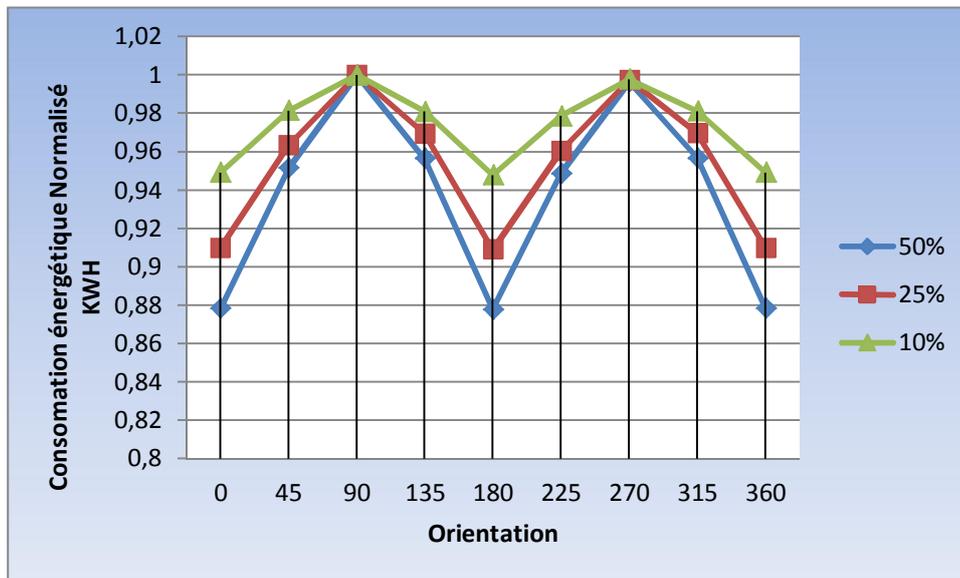


Fig.6.13 Consommation énergétique du bloc en fonction de son orientation (21 mai). Source : Auteur

Durant le 21 Mai la figure (6.13) montre que le bloc se comporte de la même manière quelque soit son orientation, sa taille et ses ouvertures. La consommation énergétique pendant ce jour est très grande par rapport aux mois de Mars et Décembre quelque soit la taille de la fenêtre et l'orientation par ce que l'altitude du soleil à cette date est près de celle du 21 juin (Solstice d'été) , autrement dit , elle est très haute et par conséquent le rayon solaire frappe le bloc par un angle solide presque de 90° apportant un flux solaire très intense et puissant ce qui augmente la charge thermique à l'intérieur des salles de classe provoquant une augmentation de la demande d'énergie pour la climatisation pour maintenir les conditions de confort.

En termes de performance les deux orientations Est et Ouest présentent les deux solutions architecturales les plus consommatrices d'énergie et de ce fait enregistrent l'indicateur de performance le plus mauvais parce que ces deux façades sont les plus frappées par les rayons solaires bas de la matinée et de l'après midi pénétrant à travers les ouvertures ce

qui augmente la charge thermique et par conséquent une augmentation de la demande d'énergie pour la climatisation pour maintenir les conditions de confort , alors que le meilleur indicateur de performance est obtenu par les orientations Nord et Sud avec une performance atteignant 13 % par rapport à celles de l'Est et l'Ouest pour une taille de fenêtre égale à 50% , 10% pour une taille de fenêtre égale à 25% et 6% pour une taille de fenêtre égale à 10% . Les autres orientations présentent des indicateurs de performances moyens par rapport au plus mauvais, elles parviennent à des performances d'environ 5% pour une taille de 50%, 4% pour une taille de fenêtre de 25% et 2% pour une taille de fenêtre de 10%.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360	
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,72	0,70	0,69	0,70	0,72	0,70	0,70	0,70	0,70	0,72
10%	0,54	0,51	0,50	0,51	0,54	0,51	0,50	0,51	0,51	0,54

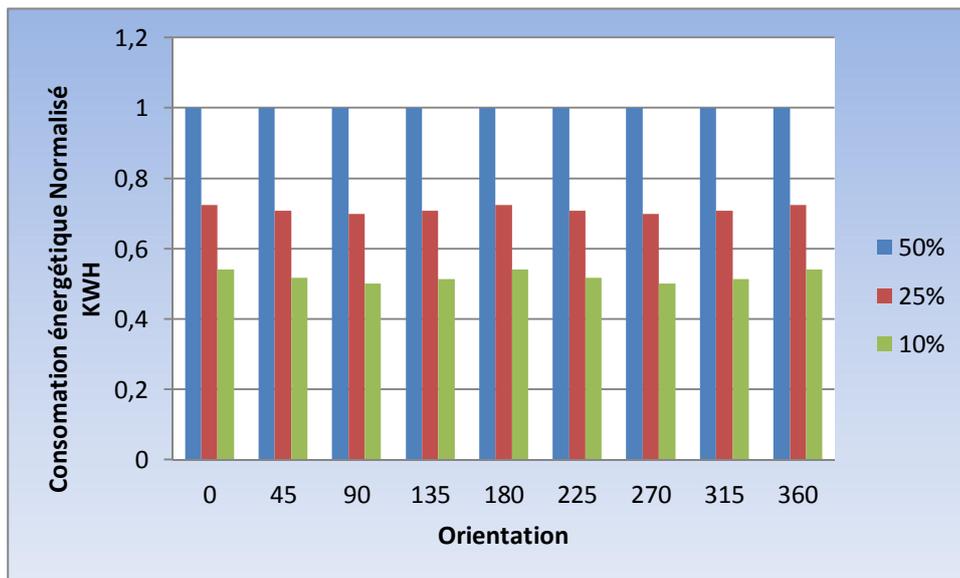


Fig.6.14 Consommation énergétique du bloc en fonction de la taille de la fenêtre (21mai). Source : Auteur

On remarque d'après la figure (6.14) que la relation entre la taille de la fenêtre et la consommation énergétique durant le jour de 21Mai est linéaire, la consommation augmente à mesure que la taille des ouvertures augmente parce que plus grande la surface des fenêtres plus grande serait la quantité du rayonnement solaire pénétré (charge thermique) et plus grande serait l'infiltration d'air chaud extérieure et plus grande serait la demande de l'énergie pour la climatisation. C'est pour ça la meilleure performance est obtenue par le

bloc dont la taille de la fenêtre est de 10%. Ce bloc présente une performance supérieure d'environ 50% par rapport à celui dont la taille de la fenêtre est de 50% et d'environ 30 % par rapport à celui dont la taille de la fenêtre est de 25% pour toutes les orientations.

VI.4.2 (21 Mars) :

✓ **Impact de l'orientation :**

TF	Orientation									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360	
50%	0,99	0,95	0,94	0,96	1	0,98	0,95	0,96	0,99	
25%	0,99	0,95	0,94	0,95	1	0,96	0,93	0,95	0,99	
10%	0,98	0,95	0,95	0,98	1	0,96	0,94	0,97	0,98	

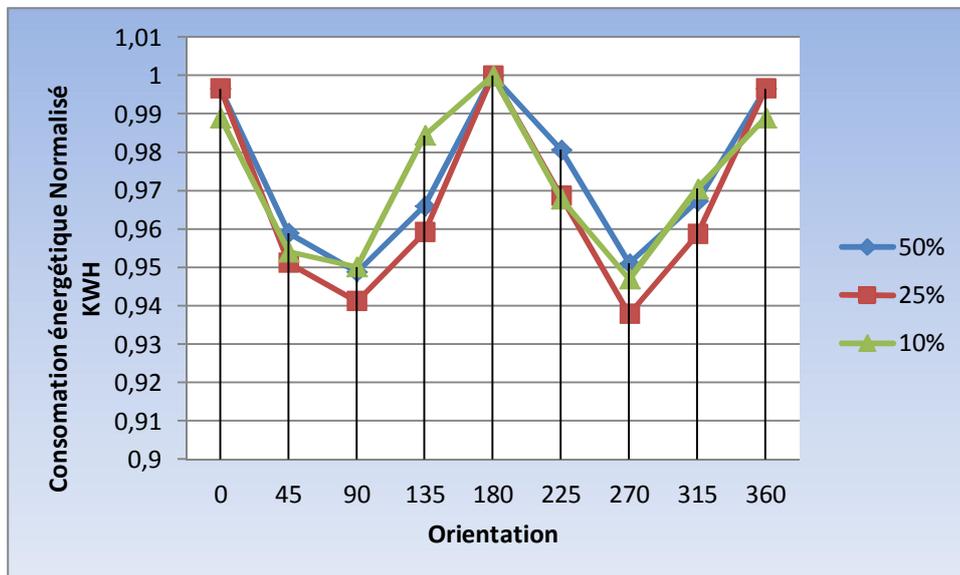


Fig.6.15 Consommation énergétique du bloc en fonction de son orientation (21Mars). Source : Auteur

Durant le 21 Mars la figure (6.15) montre que le bloc se comporte de la même manière quelque soit son orientation et la taille de ses ouvertures mais présente un comportement hiérarchique inverse par rapport au mois de Mai. La consommation énergétique (chauffage) pendant ce jour est inférieure par rapport aux mois de Décembre et de Mai quelque soit la taille de la fenêtre et l'orientation par ce que cette date représente l'équinoxe de printemps où l'altitude de soleil est moyenne ce qui laisse les températures intérieures tombent dans leur majorité écrasante dans la zones du confort et par conséquence y'en a pas de demande d'énergie pour le rafraichissement et encore moins pour le chauffage. Ce dernier est exigé parfois parce qu'y a des moments où les températures intérieures tombent au dessous de la zone du confort.

En terme de performance à l'inverse du mois de Mai le bloc orienté sur les axes Nord et Sud présente la mauvaise performance parce que ces deux façades sont les moindres touchées par l'irradiation solaire pendant la journée ce qui réduit la charge thermique et par conséquent une augmentation de la demande d'énergie pour le chauffage pour maintenir les condition de confort alors que la meilleure performance est enregistrée par les orientations Est , Ouest et Sud-est . L'écart de performance entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise parvient à 6 % pour une taille de fenêtre égale à 50%. On perçoit également que pour le mois de Mars l'orientation n'a pas un grand impacte sur la performance et le comportement du bloc par rapport au mois de Mai.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,58	0,57	0,57	0,57	0,58	0,57	0,57	0,57	0,58
10%	0,30	0,30	0,30	0,31	0,30	0,30	0,30	0,31	0,30

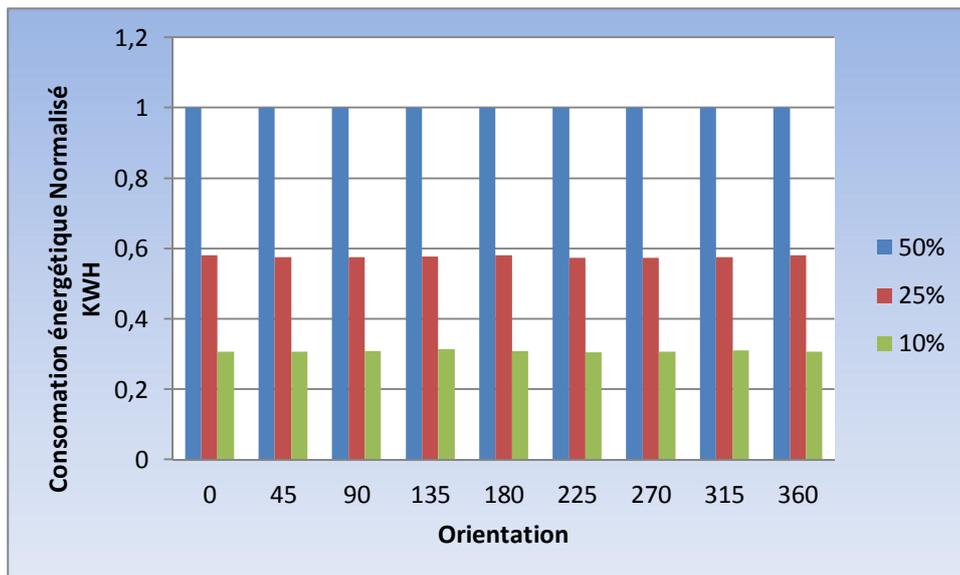


Fig.6.16 Consommation énergétique du bloc en fonction de la taille de la fenêtre (21Mars). Source : Auteur

Quant à l'impact de la taille de la fenêtre sur la performance du bloc on aperçoit d'après la figure (3.4) que le comportement suit la même logique que celle du mois de Mai où la consommation énergétique augmente à mesure que la taille de la fenêtre augmente. La taille de la fenêtre a un grand impact sur la performance ou l'écart de performance entre la

meilleure solution architecturale et la mauvaise est arrivé à 70% alors que pour le mois de mai parvient juste à 50%.

VI.4.3 (21 Décembre) :

✓ Impact de l'orientation :

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,97312	0,96262	0,96492	0,99758	0,97174	0,96293	0,96692	1	0,97312
25%	0,97253	0,96456	0,96671	0,99594	0,97117	0,96631	0,97082	1	0,97253
10%	0,97228	0,97725	0,98887	0,99724	0,97442	0,98247	0,99462	1	0,97228

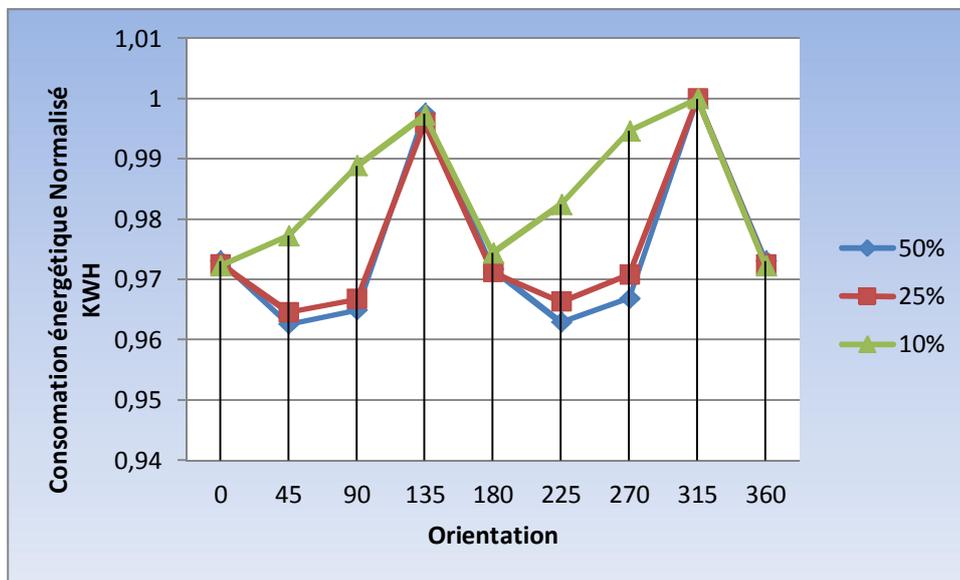


Fig.6.17 Consommation énergétique du bloc en fonction de son orientation (21 Décembre). Source : Auteur

D'après la figure (6.17) les blocs ayant des tailles de fenêtre égales à 50% et 25% durant le 21 décembre se comportent de la même manière quelque soit l'orientation alors que le bloc ayant une proportion d'ouvertures égale à 10% a un comportement contraire. La consommation énergétique (chauffage) pendant ce jour est inférieure par rapport au mois de Mai mais très grande par rapport au mois de Mars quelque soit la taille de la fenêtre et l'orientation par ce que cette date correspond au solstice, autrement dit, le soleil est très loin de la surface terrestre c'est pour ça le flux solaire moins intense voir faible ce qui réduit la charge thermique à l'intérieur des salles de classes et par conséquent une augmentation de la demande d'énergie pour chauffage pour maintenir les conditions de confort.

En termes de performance les deux orientations Nord-est et Sud-ouest présentent les deux solutions architecturales les plus consommatrices d'énergie et de ce fait enregistrent l'indicateur de performance le plus mauvais parce que ces deux façades sont les moins frappées par les rayons solaires ce qui augmente la charge thermique et par conséquent une augmentation de la demande d'énergie pour chauffage pour maintenir les conditions de confort, alors que le meilleur indicateur de performance est obtenu par les orientations Est et Nord-ouest. On perçoit que l'orientation dans le mois de décembre n'a pas vraiment grand impact sur la performance énergétique. L'écart entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise ne dépasse pas 3% pour toutes les tailles de fenêtres.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,656	0,658	0,658	0,656	0,656	0,659	0,659	0,657	0,656
10%	0,475	0,483	0,487	0,475	0,477	0,485	0,489	0,475	0,475

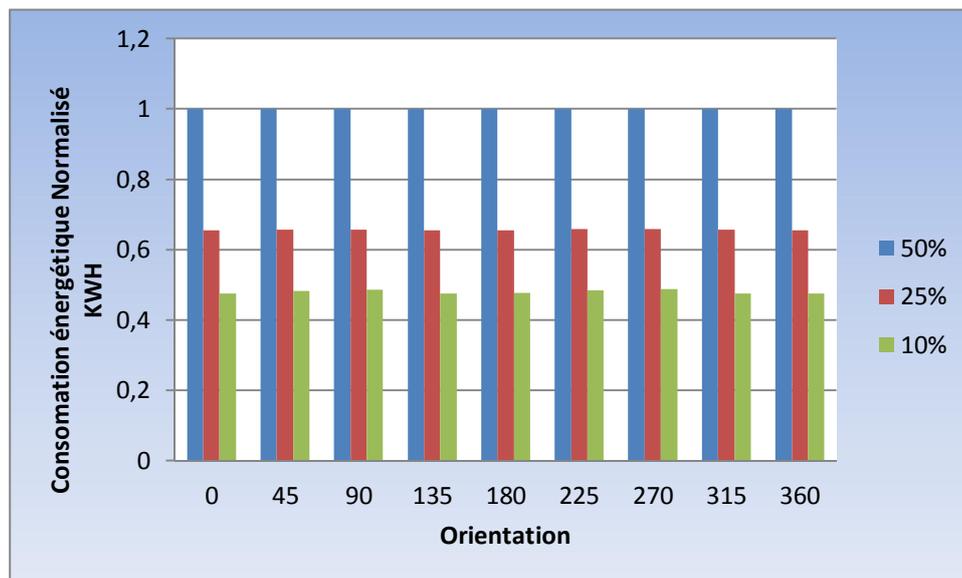


Fig.6.18 Consommation énergétique du bloc en fonction de la taille de la fenêtre (21décembre). Source : Auteur

Quant à l'impact de la taille de la fenêtre sur la performance du bloc on remarque d'après la figure (6.18) que le comportement suit la même logique de celle du mois de Mai et Mars où la consommation énergétique augmente à mesure que la taille de la fenêtre augmente. On perçoit que la taille de la fenêtre dans ce jour a un grand impact sur la performance où

l'écart de performance parvient à 53% entre la solution la plus consommatrice et la moindre consommatrice.

VI.5 L'inconfort thermique (PPD) :

VI.5.1 21 mai :

✓ **Impact de l'orientation :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	1	0,97239	0,97601	0,99152	0,99938	0,97198	0,96453	0,99183	1
25%	1	0,97557	0,96769	0,98919	0,99853	0,97399	0,96758	0,98941	1
10%	1	0,99054	0,98743	0,99601	0,99800	0,98805	0,98631	0,99601	1

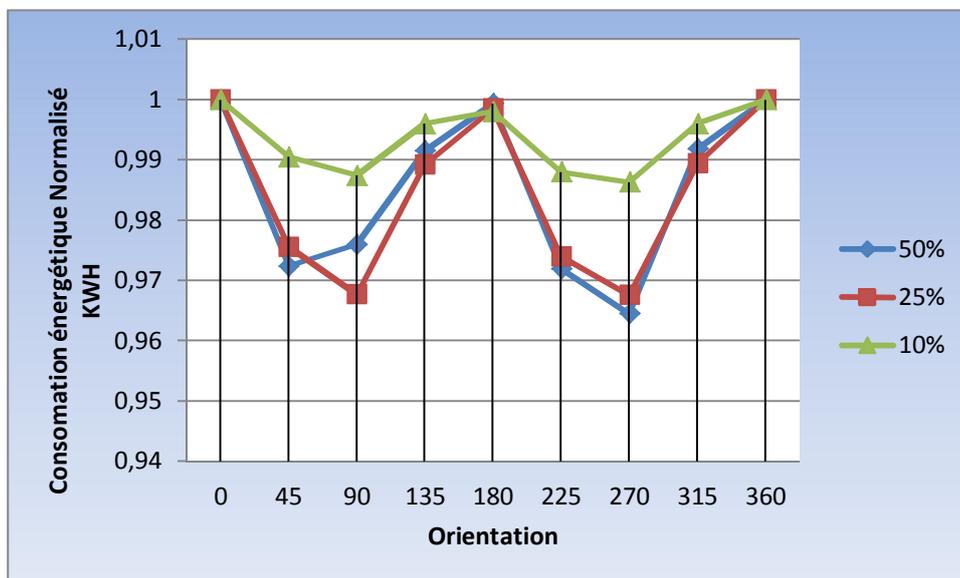


Fig.6.19 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mai. Source : Auteur

Selon la figure (6.19) le bloc durant le 21 Mai se comporte de la même manière quelque soit son orientation et sa taille et ses ouvertures. Le pourcentage du PPD pendant ce jour est très grand quelque soit la taille de la fenêtre et l'orientation par ce que l'altitude du soleil est très élevée et le soleil est plus proche de la surface terrestre et par conséquent le flux solaire est très intense ce qui augmente la charge thermique à l'intérieure des salles de classe et par conséquent une augmentation des températures intérieures dépassant parfois celles de l'extérieure ce qui augmente le pourcentage des personnes non-satisfaites.

En terme de performance les deux orientations Est et Ouest présentent les meilleures solutions architecturales parce que les bloc orientés suivant ces deux orientations sont les

moins frappés par les rayons solaires pénétrant à travers les ouvertures que se soit en terme de durée ou d'angle ce qui réduit la charge thermique et par conséquence une augmentation du pourcentage des personnes satisfaites. Ces deux orientations arrivent à une performance d'environ 4% par rapport aux orientations Nord et Sud qui représentent les mauvaises orientations.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,91852	0,92153	0,91069	0,91637	0,91775	0,92043	0,92142	0,91629	0,91852
10%	0,83074	0,84625	0,84046	0,83451	0,82960	0,84448	0,84950	0,83425	0,83074

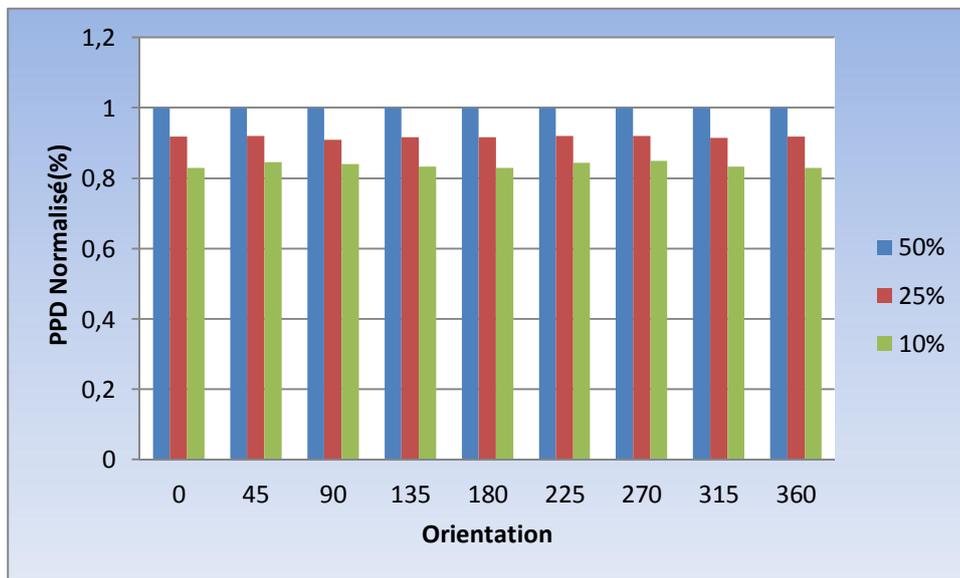


Fig.6.20 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de la taille des fenêtres durant le 21 Mai. Source : Auteur

A l'inverse de la consommation énergétique qui augmente à mesure que la taille de la fenêtre augmente. Le pourcentage des personnes non-satisfaites (PPD) d'après la figure (6.20) baisse à mesure que la taille de la fenêtre augmente. Cela parce que les grandes ouvertures favorisent une plus grande pénétration d'air dans l'environnement intérieure des salles de classes et avec un drainage d'une grande vitesse ce qui favorise les échanges par évaporation. Le fait que peu de fenêtres impliquent peu de rayonnement solaire pénétrant dans l'environnement intérieur, ne compense pas l'effet de la ventilation sur les occupants.

VI.5.2 (21 Mars) :

✓ Impact de l'orientation :

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,57551	0,73608	0,99311	0,67037	0,58611	0,74827	1	0,66507	0,57551
25%	0,80968	0,88393	0,99312	0,86523	0,81848	0,89466	1	0,86221	0,80968
10%	0,94236	0,96514	0,99524	0,96236	0,95008	0,97445	1	0,96019	0,94236

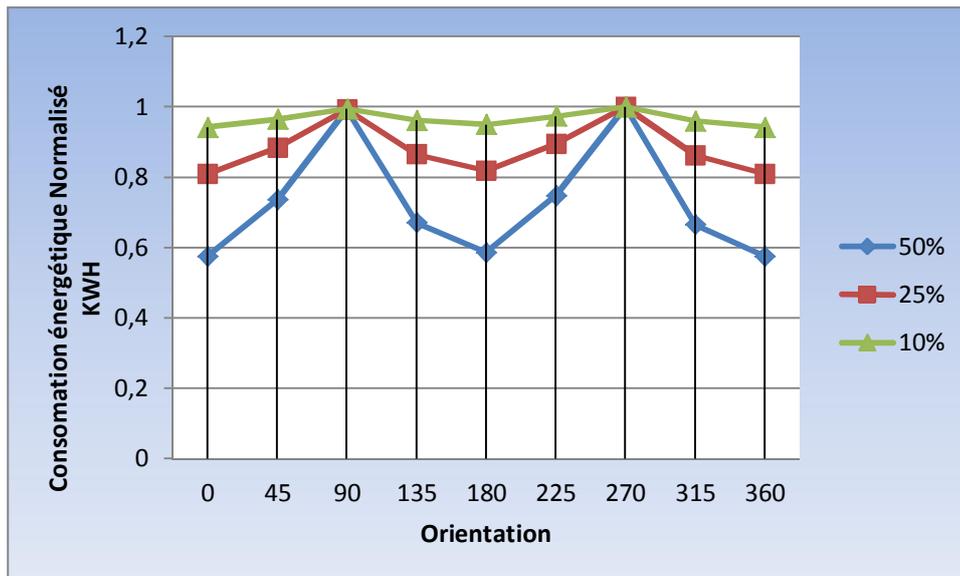


Fig.6.21 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur

Le pourcentage du PPD pendant ce jour est très grand quelque soit la taille de la fenêtre et l'orientation par ce que l'altitude du soleil est très élevée et le soleil est plus proche de la surface terrestre et par conséquent le flux solaire est très intense ce qui augmente la charge thermique à l'intérieur des salles de classes et par conséquent une augmentation des températures intérieures dépassant parfois celles de l'extérieure ce qui augmente le pourcentage des personnes non-satisfaites.

D'après la figure (6.21) les deux orientations Nord et Sud présentent les meilleures solutions architecturales en terme de performance parce que les blocs orientés suivant ces deux orientations sont les moins frappés par les rayons solaire pénétrant à travers les ouvertures que se soit en termes de durée ou d'angle ce qui réduit la charge thermique et par conséquent une augmentation du pourcentage des personnes satisfaites alors que le malaise est plus grand pour les orientations Nord et Sud qui présentent les mauvaises solutions architecturales. La différence de performance entre la meilleure solution

architecturale et la mauvaise parvient à 43%, 20% et 6% pour les blocs ayant une taille des ouvertures égale à 50%, 25% et 10% respectivement.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,22824	0,28504	0,37293	0,26034	0,23056	0,28699	0,37373	0,25887	0,22824
25%	0,61874	0,65955	0,71860	0,64745	0,62038	0,66117	0,72014	0,64665	0,61874
10%	1	1	1	1	1	1	1	1	1

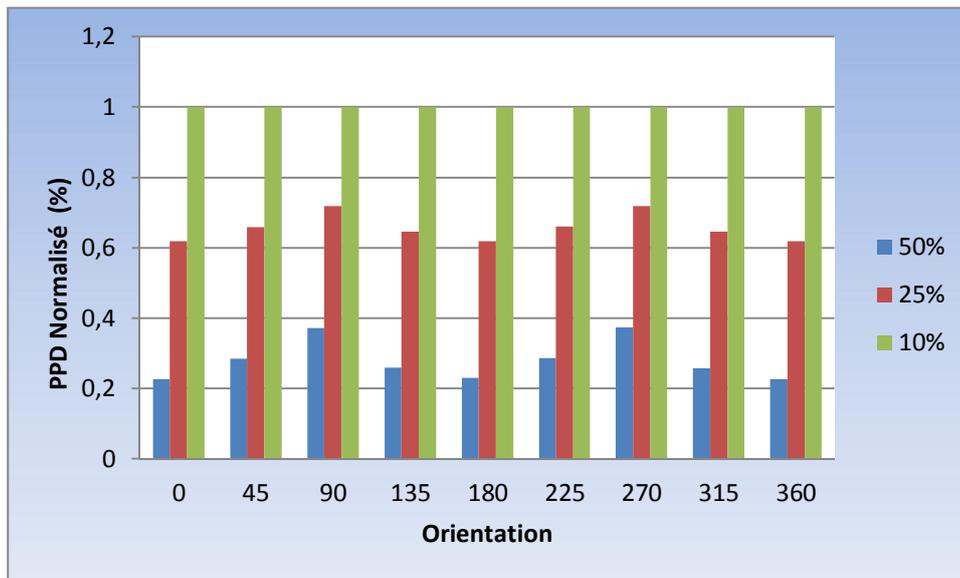


Fig.6.22 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de la taille des fenêtres durant le 21 Mars. Source : Auteur

Comme le cas du mois précédent (Mai) le comportement du bloc d'après la figure (6.22) suit la même logique, l'inconfort thermique baisse à mesure que la taille des fenêtres augmente. La différence maximale en termes de performance entre la mauvaise solution architecturale et la mauvaise est égale à 78% pour l'orientation Sud.

VI.5.3 (21 Décembre) :

✓ **Impact de l'orientation :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,95848	0,97773	0,99958	0,96759	0,95941	0,97856	1	0,96748	0,95848
25%	0,99180	0,99524	0,99979	0,99393	0,99221	0,99565	1	0,99383	0,99180
10%	0,99879	0,99929	1	0,99919	0,99899	0,99949	1	0,99909	0,99879

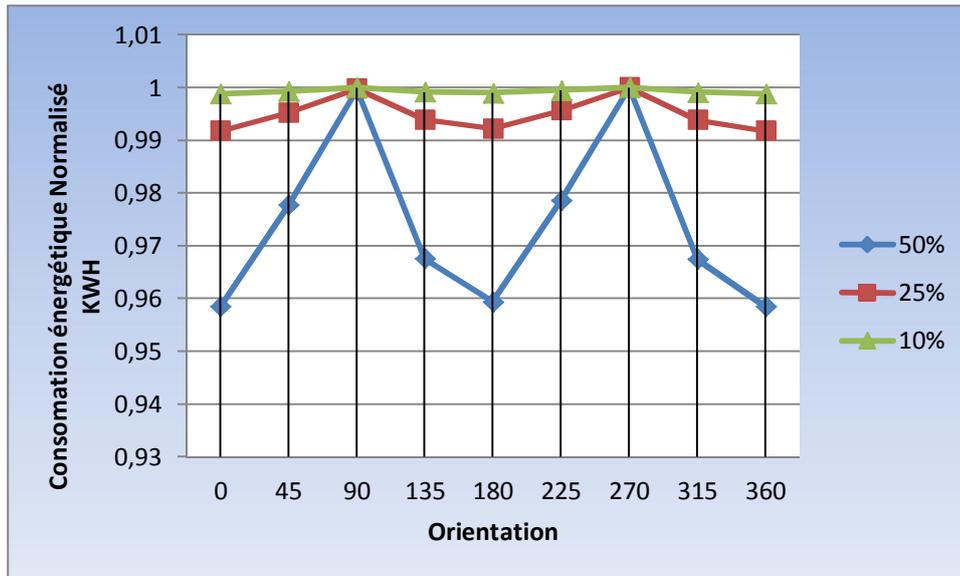


Fig.6.23 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Décembre Source : Auteur

Le pourcentage du PPD pendant ce jour est très grand quelque soit la taille de la fenêtre et l'orientation par ce que l'altitude du soleil est très basse et le soleil est plus loin de la surface terrestre et par conséquent le flux solaire est très faible ce qui fait baisser la charge thermique à l'intérieure des salles de classes et par conséquent une baisse des températures intérieures qui pour presque toute la journée n'arrivent pas à la température de confort ce qui augmente l'inconfort thermique.

Le mois de décembre se caractérise par des températures basses et par conséquent les deux orientations, en voyant la figure (6.23) , Nord et Sud au contraire du mois de Mai présentent les meilleurs solutions architecturales en termes de performance parce que les blocs orientés suivant ces deux orientations sont les plus frappés par les rayons solaire pénétrant à travers les ouvertures que ce soit en terme de durée ou d'angle ce qui augmente la charge thermique et par conséquent une augmentation du pourcentage des personnes satisfaites alors que les orientations Est et Ouest présentent les mauvaises solutions architecturales. La différence de performance entre la meilleure solution architecturale et la mauvaise parvient à 5% pour les blocs ayant une taille des ouvertures égale à 50%.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,93147	0,94971	0,97025	0,93995	0,93219	0,95032	0,97065	0,93994	0,93147
25%	0,98661	0,98954	0,99336	0,98833	0,98682	0,98974	0,99356	0,98833	0,98661
10%	1	1	1	1	1	1	1	1	1

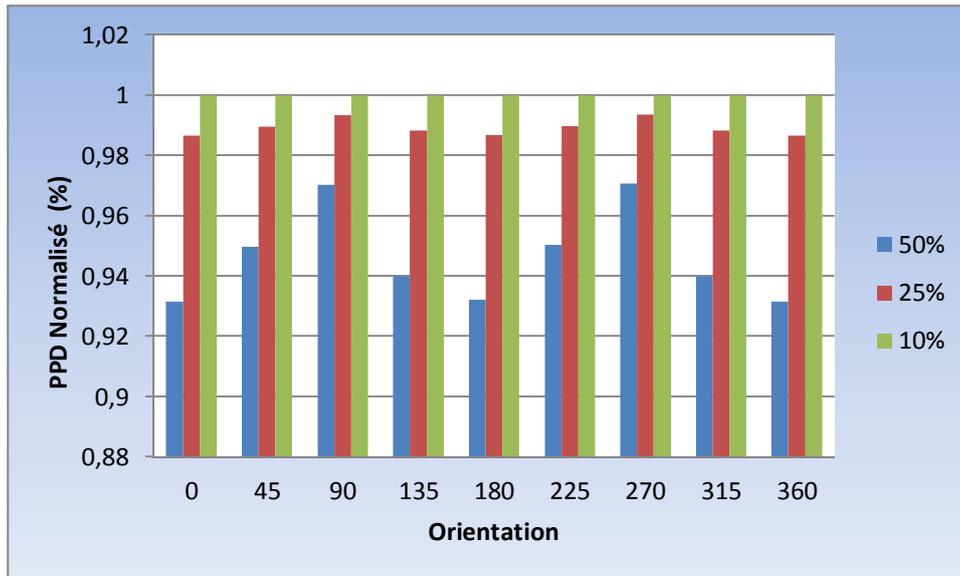


Fig.6.24 Inconfort thermique dans les salles de classes en fonction de la taille des fenêtres durant le 21 Décembre. Source : Auteur

Le comportement du bloc en fonction de la taille de la fenêtre d'après la figure (6.24) suit la même logique comme les deux mois précédent. L'inconfort thermique baisse à mesure que la taille des fenêtres augmente. La différence maximale en termes de performance entre la mauvaise solution architecturale et la mauvaise est égale à 7% pour les deux orientations Sud et Nord.

VI.6 L'exposition au soleil (l'ensoleillement) :

VI.6.1 (21 Décembre) :

✓ Impact de l'orientation :

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,61713	0,73595	0,84157	0,95711	0,67332	0,69307	0,75580	1	0,61713
25%	0,60899	0,61272	0,76696	0,85334	0,54138	0,53380	0,75938	1	0,60899
10%	0,58	0,52496	0,76992	0,78	0,4	0,47488	0,70992	1	0,58

On remarque d'après la figure (6.25) que le bloc réagit par le même comportement durant le 21 Décembre. L'orientation Sud-ouest représente la mauvaise solution architecturale avec un indicateur de performance égale à 1 quelque soit l'orientation ou la taille de la fenêtre alors que l'orientation Sud représente la meilleure solution architecturale pour le bloc ayant une proportion des ouvertures égale à 50%, l'orientation Nord-ouest pour le bloc ayant une proportion des ouvertures égale à 25% et l'orientation Nord pour le bloc

ayant une proportion des ouvertures égale à 10% avec des indicateurs de performance égales à 0,61, 0,53 et 0,4 respectivement ce qui correspond à des différences de performance entre la meilleure solution et la mauvaise égales à 39%, 47% et 60% respectivement.

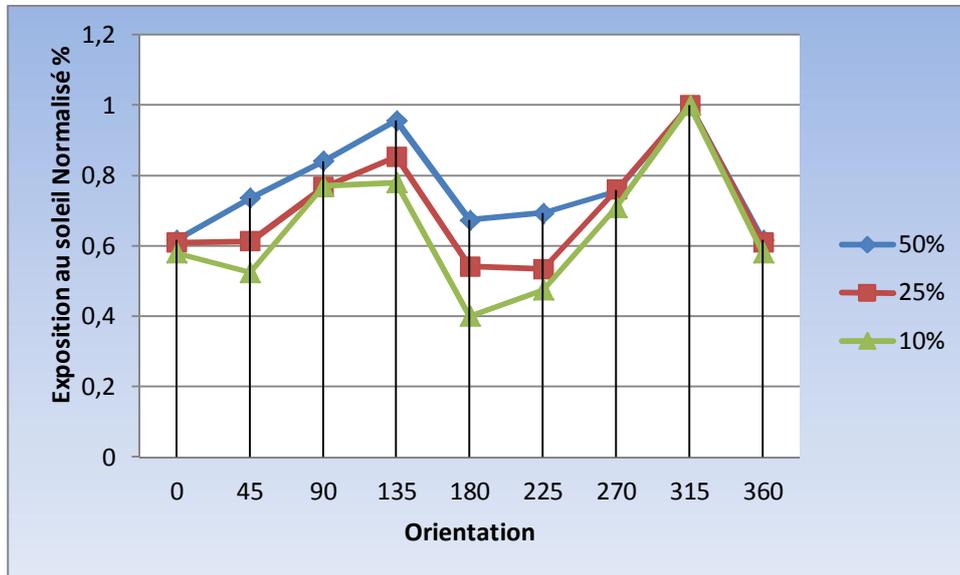


Fig.6.25 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'ensoleillement > 0 en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Décembre. Source : Auteur

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,86633	0,73091	0,80007	0,78271	0,70588	0,67616	0,88205	0,87790	0,86633
10%	0,6204	0,47086	0,60391	0,53796	0,39215	0,45230	0,62003	0,66011	0,6204

D'après la figure (6.26) on perçoit que plus grande soit la taille de l'ouverture plus grande serait le pourcentage des points ensoleillés à l'intérieure des salles de classes. C'est pour ça le bloc ayant une taille des ouvertures égale à 50% présente la mauvaise solution architecturale alors que celui dont la taille des ouvertures égale à 10% représente la meilleure solution architecturale. La différence maximale de performance entre la meilleure solution et la mauvaise est égale à 61% pour l'orientation Nord.

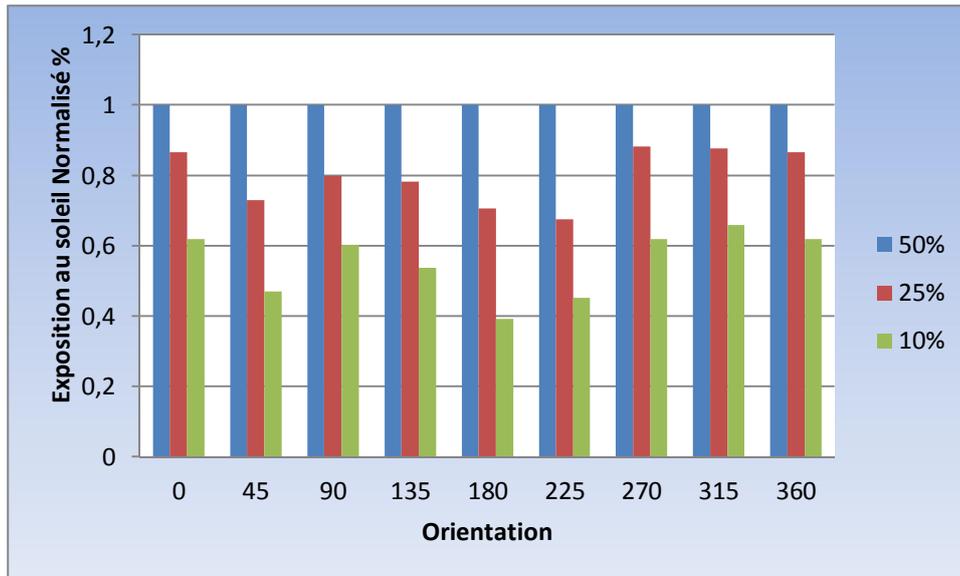


Fig.6.26 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'enseillement > 0 en fonction de la taille de la fenetre du bloc durant le 21 Décembre. Source : Auteur

VI.6.2 (21 Mai) :

✓ Impact de l'orientation :

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,16987	0,73513	0,91297	0,37149	0,15810	0,80635	1	0,41108	0,16987
25%	0,14635	0,73889	0,83428	0,40114	0,14635	0,84080	1	0,43314	0,14635
10%	0,12904	0,53750	0,61287	0,43014	0,17205	0,70956	1	0,44081	0,12904

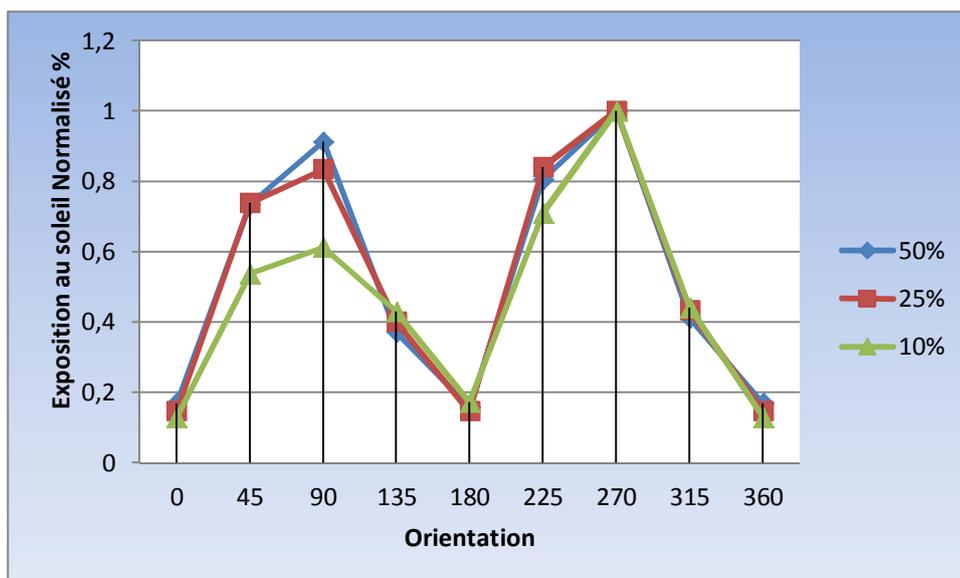


Fig.6.27 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'enseillement > 0 en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mai. Source : Auteur

L'orientation Ouest d'après la figure (6.27) représente la mauvaise solution architecturale avec un indicateur de performance égal à 1 alors que les orientations Sud et Nord représentent la meilleure solution architecturale. La différence de performance entre la meilleure solution et la mauvaise est égale à 85%, 86% et 88% pour les blocs ayant une taille des ouvertures égale à 50%, 25% et 10% respectivement.

✓ **Impact de la taille des ouvertures :**

TF	Orientation									
	0	45	90	135	180	225	270	315	360	
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
25%	0,53462	0,62371	0,56705	0,67007	0,5744	0,64705	0,62054	0,65384	0,53462	
10%	0,27922	0,26875	0,24674	0,42560	0,4	0,32345	0,36756	0,39415	0,27922	

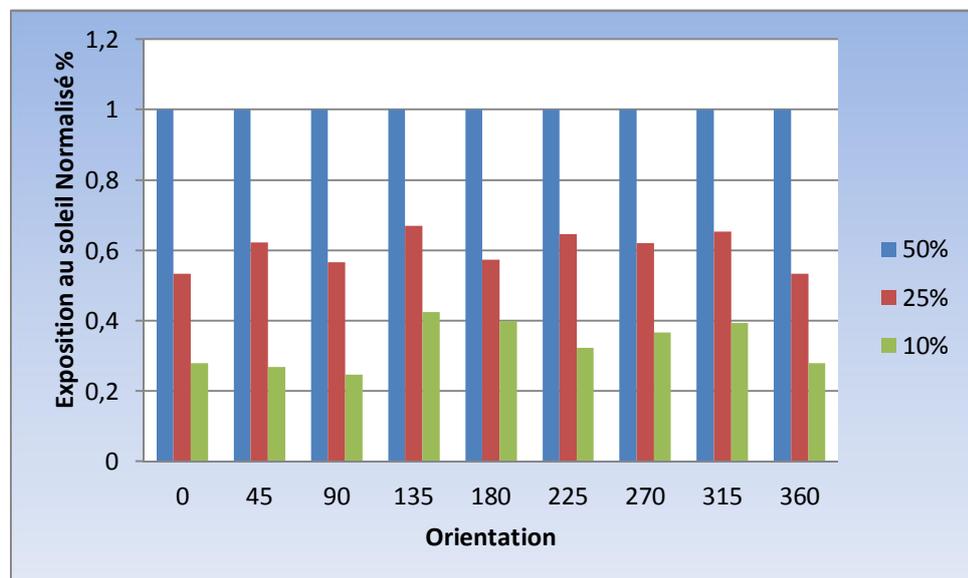


Fig.6.28 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre des heures d'enseillement > 0 en fonction de la taille de la fenêtre du bloc durant le 21 Mai. Source : Auteur

Selon la figure (6.28) le comportement du bloc durant le 21 mai par rapport à la taille des fenêtres reste le même comme le mois de décembre. Le pourcentage des points ensoleillé augmente à mesure que la taille des ouvertures augmente. La différence maximale entre la meilleure solution et la mauvaise en terme de performance est égale à 76% pour l'orientation Est.

VI.6.3 (21 Mars) :

✓ Impact de l'orientation :

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	0,10596	0,67488	0,92581	0,69263	0,26495	0,72792	1	0,78446	0,10596
25%	0,09642	0,51312	0,89473	0,65347	0,21922	0,60519	1	0,75873	0,09642
10%	0,04415	0,55053	0,77840	0,56957	0,19607	0,59489	1	0,64553	0,04415

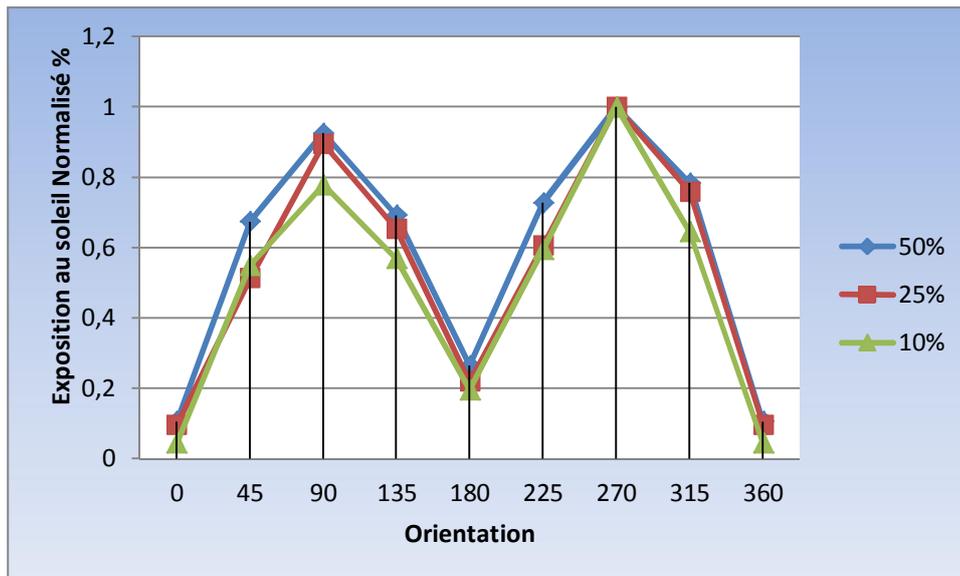


Fig.6.29 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travail auxquels le nombre de heures d'ensoleillement > 0 en fonction de l'orientation du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur

D'après la figure (6.29) L'orientation Ouest comme le cas du mois de Mai représente la mauvaise solution architecturale avec un indicateur de performance égal à 1 quelque soit l'orientation ou la taille des fenêtres du bloc alors que l'orientation Sud suivie légèrement par celle du Nord représentent les meilleures solutions architecturales. La différence de performance entre la meilleure solution et la mauvaise égale à 90%, 91% et 96% pour les blocs ayant une taille des ouvertures égale à 50%, 25% et 10% respectivement.

✓ Impact de la taille des ouvertures :

TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25%	0,733	0,612	0,778	0,76	0,666	0,669	0,805	0,779	0,733
10%	0,232	0,455	0,469	0,459	0,413	0,456	0,558	0,459	0,232

D'après la figure (6.30) le comportement du bloc durant le 21 Mars par rapport à la taille des fenêtres reste le même comme les deux mois précédents Mai et décembre. Le pourcentage des points ensoleillés augmente à mesure que de la taille des ouvertures augmente. La différence maximale entre la meilleure solution et la mauvaise en termes de performance est égale à 77% pour l'orientation Sud.

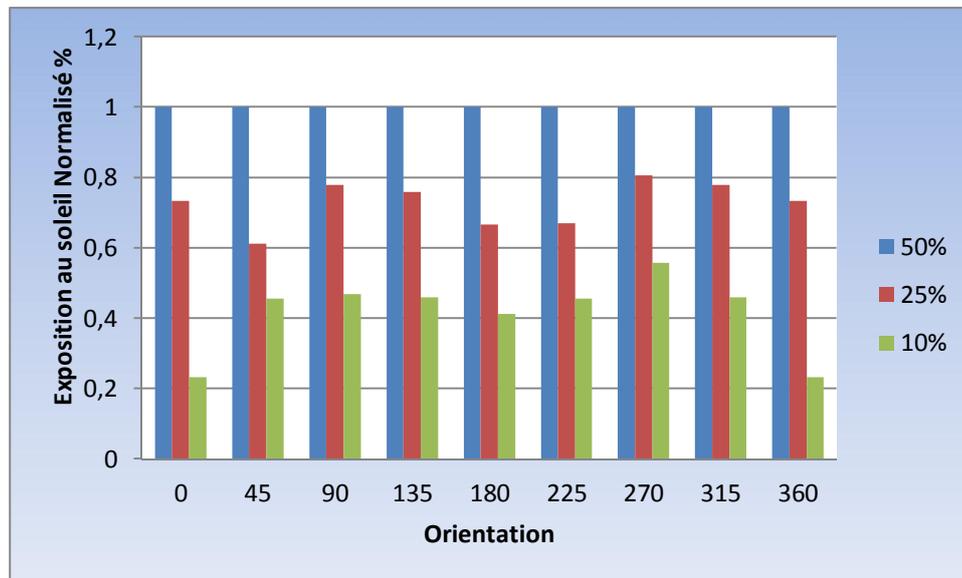


Fig.6.30 Le pourcentage (%) des points au niveau du plan de travaille auxquels le nombre des heures d'ensoleillement > 0 en fonction de la taille de la fenêtre du bloc durant le 21 Mars. Source : Auteur

VI.7 Application de l'approche multicritère :(Saw method) :

Considérant les critères mentionnés ci-dessous dans le tableau (6-1) : on passe aux étapes de l'approche multicritère en utilisant la méthode « Simple Additive Weighting)

Critères	Explication
C1	Lumière naturelle (Eclairément)
C2	Confort visuel (Uniformité d'éclairément)
C3	Inconfort thermique (PPD)
C4	Consommation énergétique
C5	Ensoleillement

Tableau 6.1 : les critères considérés. Source : Auteur

VI.7.1 Etape 1 :

A- Développement de la matrice de comparaison par paires

Dans ce travaille chaque critère est comparé avec un autre un par un en utilisant l'échelle de 1-9 de Saaty (voir chapitre). Dans cette étude on limite l'échelle juste de 1-5 (voir tableau 6-2) pour la maitrise des critères. Les résultats de la matrice de comparaison binaire paires sont présentés dans le tableau 6.3

la valeur de l'importance	définition
1	importance égale
2	importance égale à moyenne
3	importance moyenne
4	importance moyenne à forte
5	importance forte

Tableau (6.2) Echelle de Saaty (1980)

Critères	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1	2	2	5	3
C2	0,5	1	1	4	2
C3	0,5	1	1	4	2
C4	0,2	0,25	0,25	1	0,5
C5	0,33	0,5	0,5	2	1
Total	2,53	4,75	3,75	16	8,5

Tableau 6.3 La matrice de comparaison : source : Auteur

B- le calcul des poids des critères :

Les poids calculé pour chaque critère sont présentés dans le tableau 6.4

Critères	C1	C2	C3	C4	C5	Poids
C1	0,395257	0,421053	0,533333	0,3125	0,352941	0,403017
C2	0,197628	0,210526	0,266667	0,25	0,235294	0,232023
C3	0,197628	0,210526	0,266667	0,25	0,235294	0,232023
C4	0,079051	0,052632	0,066667	0,0625	0,058824	0,063935
C5	0,130435	0,105263	0,133333	0,125	0,117647	0,122336

Tableau 6.4 Le calcul des poids des critères. Source : Auteur.

C- Évaluation du Ratio de Cohérence (Consistency ratio) :

- Le calcul du vecteur de la somme pondérée (the weighted sum vector) : les résultats sont présentés dans le tableau 6.5.

Critères	C1	C2	C3	C4	C5	Poids	Résultats
C1	1	2	2	5	3	0,403017	2,017789
C2	0,5	1	1	4	2	0,232023	1,165964
C3	0,5	1	1	4	2	0,232023	1,165964
C4	0,2	0,25	0,25	1	0,5	0,063935	0,321717
C5	0,33	0,5	0,5	2	1	0,122336	0,615224

X =

Tableau 6.5 Matrice de la somme pondérée. Source: Auteur

Déterminer le vecteur de cohérence : les résultats sont présentés dans le tableau 6.6

WSM	Poids	Résultats
2,017789	0,403017	5,006713
1,165964	0,232023	5,025208
1,165964	0,232023	5,025208
0,321717	0,063935	5,031974
0,615224	0,122336	5,02898

Tableau 6.6 vecteur de cohérence. Source : Auteur

- Calculer lambda (λ)

$$\lambda = 5,023617$$

- Le calcul de Index de Cohérence CI :

$$CI = 0,005904$$

- Calcul du Ratio de Cohérence CR :

$$CR = 0,005272$$

$CR < 0.10$ donc le rapport indique un niveau raisonnable de cohérence dans les comparaisons binaires.

VI.7.2 Etape 2 :

A- Construire une matrice de décision des solutions architecturales

Les valeurs de simulation sont données par rapport à trois jours typique de l'année (21 décembre, 21 Mai et 21 Mars). Donc avant de construire la matrice des solutions d'abord on doit trouver la valeur globale des 3 jours. On a opté pour la moyenne des valeurs de simulation des trois jours pour tous les critères sauf pour la consommation énergétique on a opté pour la somme. Les valeurs globales sont présentées dans le tableau 6.8. Pour les résultats de simulation bruts et détaillés, voir annex 2.

Consommation énergétique (WH)									
TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	5037786	5273008	5448209	5340142	5035737	5275058	5439051	5344101	5037786
25%	3485270	3601853	3694629	3646287	3483237	3601453	3690408	3649842	3485270
10%	2517189	2573953	2614289	2590475	2518024	2574305	2613241	2590070	2517189

Inconfort thermique PPD (%)									
TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	66,72	67,46	69,89	67,33	66,79	67,55	69,58	67,31	66,72
25%	72,11	72,40	73,64	72,53	72,19	72,50	73,73	72,50	72,11
10%	75,77	75,92	76,36	76,01	75,85	76,01	76,41	75,97	75,77

Ensoleillement (%)									
TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	27,08	62,49	77,91	60,41	33,23	64,58	79,68	65,52	27,08
25%	21,56	41,25	56,14	45,72	22,60	42,91	61,14	52,81	21,56
10%	14,06	25,20	34,79	29,79	13,23	26,56	40,93	35,73	14,06

Lumière naturelle en terme d'éclairément (%)									
TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	2,78	0,00	3,70	6,79	0,00	0,00	4,63	9,57	2,78
25%	36,73	20,99	23,46	30,56	21,30	14,81	13,27	34,57	36,73
10%	20,37	27,78	19,14	18,52	21,30	37,65	32,41	15,43	20,37

Confort visuel en terme d'uniformité (%)									
TF	Orientation								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
50%	83,74	81,52	84,24	89,49	77,68	73,13	73,33	81,31	83,74
25%	71,52	69,29	69,60	76,36	68,38	60,71	65,45	67,88	71,52
10%	47,88	53,23	45,96	44,44	51,01	57,98	53,64	44,95	47,88

Tableau 6.7 les valeurs des solutions architecturales pour les trois jours. Source : Auteur

Après avoir les résultats de simulation pour les 3 jours on passe à la construction de la matrice de la décision des solutions. La matrice de décision est présentée dans le tableau 6.9.

Alternatives	OR	TF	CL	Max	Max	Min	Min	Min
				C1	C2	C3	C4	C5
solution 1	0	50	Oui	2,78	83,74	0	5037786	27,08
solution 2	0	50	Non	2,78	83,74	66,72	0	27,08
solution 3	0	25	Oui	36,73	71,52	0	3485270	21,56
solution 4	0	25	Non	36,73	71,52	72,11	0	21,56
solution 5	0	10	Oui	20,37	47,88	0	2517189	14,06
solution 6	0	10	Non	20,37	47,88	75,77	0	14,06
solution 7	45	50	Oui	0,	81,52	0	5273008	62,49
solution 8	45	50	Non	0	81,52	67,46	0	62,49
solution 9	45	25	Oui	20,99	69,29	0	3601853	41,25
solution 10	45	25	Non	20,99	69,29	72,40	0	41,25

solution 11	45	10	Oui	27,78	53,23	0	2573953	25,20
solution 12	45	10	Non	27,78	53,23	75,92	0	25,20
solution 13	90	50	Oui	3,70	84,24	0	5448209	77,91
solution 14	90	50	Non	3,70	84,24	69,89	0	77,91
solution 15	90	25	Oui	23,46	69,60	0	3694629	56,14
solution 16	90	25	Non	23,46	69,60	73,64	0	56,14
solution 17	90	10	Oui	19,14	45,96	0	2614289	34,79
solution 18	90	10	Non	19,14	45,96	76,36	0	34,79
solution 19	135	50	Oui	6,79	89,49	0	5340142	60,41
solution 20	135	50	Non	6,79	89,49	67,33	0	60,41
solution 21	135	25	Oui	30,56	76,36	0	3646287	45,72
solution 22	135	25	Non	30,56	76,36	72,53	0	45,72
solution 23	135	10	Oui	18,52	44,44	0	2590475	29,79
solution 24	135	10	Non	18,52	44,44	76,01	0	29,79
solution 25	180	50	Oui	0	77,68	0	5035737	33,23
solution 26	180	50	Non	0	77,68	66,79	0	33,23
solution 27	180	25	Oui	21,30	68,38	0	3483237	22,60
solution 28	180	25	Non	21,30	68,38	72,19	0	22,60
solution 29	180	10	Oui	21,30	51,01	0	2518024	13,23
solution 30	180	10	Non	21,30	51,01	75,85	0	13,23
solution 31	225	50	Oui	0	73,13	0	5275058	64,58
solution 32	225	50	Non	0	73,13	67,55	0	64,58
solution 33	225	25	Oui	14,81	60,71	0	3601453	42,91
solution 34	225	25	Non	14,81	60,71	72,50	0	42,91
solution 35	225	10	Oui	37,65	57,98	0	2574305	26,56
solution 36	225	10	Non	37,65	57,98	76,01	0	26,56
solution 37	270	50	Oui	4,63	73,33	0	5439051	79,68
solution 38	270	50	Non	4,63	73,33	69,58	0	79,68
solution 39	270	25	Oui	13,27	65,45	0	3690408	61,14
solution 40	270	25	Non	13,27	65,45	73,73	0	61,14
solution 41	270	10	Oui	32,41	53,64	0	2613241	40,93
solution 42	270	10	Non	32,41	53,64	76,41	0	40,93
solution 43	315	50	Oui	9,57	81,31	0	5344101	65,52
solution 44	315	50	Non	9,57	81,31	67,31	0	65,52
solution 45	315	25	Oui	34,57	67,88	0	3649842	52,81
solution 46	315	25	Non	34,57	67,88	72,50	0	52,81
solution 47	315	10	Oui	15,43	44,95	0	2590070	35,73
solution 48	315	10	Non	15,43	44,95	75,97	0	35,73

Tableau 6.8 La matrice de décision (S× N). Source : Auteur

B- Construire une matrice de décision normalisée des solutions architecturales :

Pour normaliser les valeurs brutes de la matrice de décision les équations ci-dessous sont appliquées :

$$X_{ij} = \frac{a_{ij} - a_j^{\min}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}} \dots\dots\dots \text{pour les critères maximisés}$$

$$X_{ij} = \frac{a_j^{\max} - a_{ij}}{a_j^{\max} - a_j^{\min}} \dots\dots\dots \text{pour les critères minimisés}$$

a_j^{\max} C'est la valeur maximale du critère

a_j^{\min} C'est la valeur minimale du critère

X_{ij} C'est la valeur normalisé

a_{ij} C'est la valeur de la simulation

Par l'application des équations ci-dessus on obtient la matrice de décision normalisé (voir tableau 6.10)

Alternatives	OR	TF	CL	Max	Max	Min	Min	Min
				C1	C2	C4	C3	C5
solution 1	0	50	Oui	0,07377	0,872197	0,075332	0	0,791594
solution 2	0	50	Non	0,07377	0,872197	1	0,126898	0,791594
solution 3	0	25	Oui	0,97541	0,600897	0,360291	0	0,874655
solution 4	0	25	Non	0,97541	0,600897	1	0,056317	0,874655
solution 5	0	10	Oui	0,540984	0,076233	0,537979	0	0,987461
solution 6	0	10	Non	0,540984	0,076233	1	0,008419	0,987461
solution 7	45	50	Oui	0	0,82287	0,032158	0	0,258665
solution 8	45	50	Non	0	0,82287	1	0,117213	0,258665
solution 9	45	25	Oui	0,557377	0,55157	0,338892	0	0,578372
solution 10	45	25	Non	0,557377	0,55157	1	0,052521	0,578372
solution 11	45	10	Oui	0,737705	0,195067	0,52756	0	0,819782
solution 12	45	10	Non	0,737705	0,195067	1	0,0065	0,819782
solution 13	90	50	Oui	0,098361	0,883408	0	0	0,026684
solution 14	90	50	Non	0,098361	0,883408	1	0,085325	0,026684
solution 15	90	25	Oui	0,622951	0,558296	0,321864	0	0,354216
solution 16	90	25	Non	0,622951	0,558296	1	0,036294	0,354216
solution 17	90	10	Oui	0,508197	0,033632	0,520156	0	0,675578
solution 18	90	10	Non	0,508197	0,033632	1	0,000654	0,675578
solution 19	135	50	Oui	0,180328	1	0,019835	0	0,289963
solution 20	135	50	Non	0,180328	1	1	0,118827	0,289963
solution 21	135	25	Oui	0,811475	0,70852	0,330737	0	0,51101
solution 22	135	25	Non	0,811475	0,70852	1	0,050776	0,51101
solution 23	135	10	Oui	0,491803	0	0,524527	0	0,750765
solution 24	135	10	Non	0,491803	0	1	0,005235	0,750765
solution 25	180	50	Oui	0	0,737668	0,075708	0	0,699052
solution 26	180	50	Non	0	0,737668	1	0,125894	0,699052

solution 27	180	25	Oui	0,565574	0,53139	0,360664	0	0,858956
solution 28	180	25	Non	0,565574	0,53139	1	0,055313	0,858956
solution 29	180	10	Oui	0,565574	0,14574	0,537825	0	1
solution 30	180	10	Non	0,565574	0,14574	1	0,007329	1
solution 31	225	50	Oui	0	0,636771	0,031781	0	0,227266
solution 32	225	50	Non	0	0,636771	1	0,116036	0,227266
solution 33	225	25	Oui	0,393443	0,360987	0,338966	0	0,553293
solution 34	225	25	Non	0,393443	0,360987	1	0,051256	0,553293
solution 35	225	10	Oui	1	0,300448	0,527495	0	0,799418
solution 36	225	10	Non	1	0,300448	1	0,005235	0,799418
solution 37	270	50	Oui	0,122951	0,641256	0,001681	0	0
solution 38	270	50	Non	0,122951	0,641256	1	0,089426	0
solution 39	270	25	Oui	0,352459	0,466368	0,322638	0	0,278979
solution 40	270	25	Non	0,352459	0,466368	1	0,03516	0,278979
solution 41	270	10	Oui	0,860656	0,204036	0,520349	0	0,583087
solution 42	270	10	Non	0,860656	0,204036	1	0	0,583087
solution 43	315	50	Oui	0,254098	0,818386	0,019109	0	0,213171
solution 44	315	50	Non	0,254098	0,818386	1	0,119176	0,213171
solution 45	315	25	Oui	0,918033	0,520179	0,330084	0	0,404374
solution 46	315	25	Non	0,918033	0,520179	1	0,051213	0,404374
solution 47	315	10	Oui	0,409836	0,011211	0,524602	0	0,661434
solution 48	315	10	Non	0,409836	0,011211	1	0,005758	0,661434

Tableau 6.9 La matrice de décision normalisée. Source : Auteur

VI.7.3 Etape 3 :

La méthode Simple additive weighting évalue chaque solution par la formule ci-dessous :

$$S_{SAW} = \max_j \sum_{i=1}^m x_{ij} \times w_i, \quad j = 1, \dots, n.$$

x_{ij} C'est la valeur normalisé

w_i C'est le poids du critère

S_{SAW} C'est le score total de la solution

n c'est le nombre de critères.

Le résultat de l'application est présent dans le tableau (6.10) présenté ci-dessous :

Solutions	Score finale	Classement	Solutions	Score finale	Classement
solution 1	0,565780	17	solution 25	0,493539	29
solution 2	0,422319	36	solution 26	0,349820	43
solution 3	0,894588	1	solution 27	0,711393	7
solution 4	0,716531	6	solution 28	0,533080	23
solution 5	0,622934	14	solution 29	0,650495	11
solution 6	0,422403	35	solution 30	0,449721	32
solution 7	0,456648	31	solution 31	0,409603	38
solution 8	0,313700	46	solution 32	0,266406	48
solution 9	0,677055	9	solution 33	0,563703	18
solution 10	0,499486	27	solution 34	0,385836	39
solution 11	0,708609	8	solution 35	0,836273	2
solution 12	0,508299	26	solution 36	0,635674	12
solution 13	0,479900	30	solution 37	0,430468	34
solution 14	0,331609	44	solution 38	0,283021	47
solution 15	0,676532	10	solution 39	0,537035	22
solution 16	0,496286	28	solution 40	0,356477	41
solution 17	0,560542	19	solution 41	0,730823	5
solution 18	0,359349	40	solution 42	0,529467	24
solution 19	0,573462	16	solution 43	0,551614	21
solution 20	0,431676	33	solution 44	0,409955	37
solution 21	0,807115	3	solution 45	0,793273	4
solution 22	0,629662	13	solution 46	0,615963	15
solution 23	0,555609	20	solution 47	0,514252	25
solution 24	0,355200	42	solution 48	0,313960	45

Tableau 6.10 Résultats finale des solutions architecturales avec leurs classements. Source : Auteur

D'après le tableau 6-11 des résultats finals du « rangement », la solution architecturale dont l'orientation Sud, taille de fenêtres égale à 25% et une climatisation présente la meilleure performance avec un score 0,894 de suivie par la solution architecturale dont l'orientation Nord-ouest , taille de fenêtres égale à 10% et dotée d'une climatisation avec un score de 0,836 alors que la solution architecturale dont l'orientation Nord-ouest, taille de fenêtres égale à 50% et une climatisation absente représente la mauvaise performance avec un score de 0,266. On perçoit également que les 5 meilleurs solutions architecturale se caractérise par la présence d'une climatisation et une taille de fenêtres qui ne dépasse jamais 25% alors que les mauvaises solutions architecturale se caractérise par une climatisation absente et une taille de fenêtres de 50% .

VI.8 Conclusion :

Le présent chapitre a pour finalité de présenter le comportement du bloc à travers des graphes. Les graphes sont obtenus grâce au traitement des résultats des simulations sur le modèle virtuel du bloc et d'une comparaison entre les comportements du bloc pour les périodes d'été, d'hiver et de printemps. Toutes les simulations avaient été réalisées en employant les logiciels ©Ecotect et ©Radiance. Les résultats des simulations obtenus sont indiquées dans l'annexe (2). Une méthode totaliste multicritère d'aide à la conception architecturale est présentée et appliquée de manière détaillée.

Les simulations ont pour objectif la détermination des graphes descriptives du comportement du bloc par rapport à chacun des paramètres étudiés (Orientations, taille de fenêtres et type de climatisations) ainsi que la provision de données pour l'application de la méthode multicritère. 48 combinaisons différentes du projet avaient été classées.

Conclusion générale

Dans la conception architecturale en général et la conception bioclimatique plus spécifiquement, l'objectif de l'architecte devant sa table de dessin est de trouver des solutions architecturales satisfaisantes et efficaces pour concevoir le projet architectural. Vis-à-vis d'un certain nombre de variables importantes qu'elles soient qualitatives ou quantitatives (surface des fenêtres, esthétique, la consommation énergétique, le cout du projet, la flexibilité... etc.), l'architecte fixe des valeurs, et forme une combinaison qui ne représente qu'une seule parmi une infinité de possibilités. Néanmoins, plusieurs de ces « combinaisons » sont satisfaisantes aux yeux de l'architecte. Il doit alors décider entre plusieurs bonnes alternatives possibles de projet.

Des problèmes de décision complexes de ce type impliquent différents experts et des critères multiples et conflictuels qui ont besoin d'être combinés pour l'obtention d'une solution optimale qui répond au mieux à tous les critères. Augmenter la dimension des fenêtres par exemple, signifie non seulement utiliser plus de lumière naturelle dans les environnements, mais aussi augmenter la charge thermique à l'intérieur du bâtiment. De ce fait, il est difficile d'évaluer la « qualité » globale d'une solution architecturale proposée. Ainsi, ce n'est pas rare que les valeurs calculées pour quelques critères soient sujettes à des imprécisions, et indéterminations et parfois une subjectivité. En outre, dans les applications réelles, il est toujours impossible de définir précisément les valeurs pour tous les critères. Pour ces raisons, des procédures basées sur une analyse multicritère sont largement utilisées dans la sélection de projets quand les variables du problème ne peuvent pas être décontextualisées. Ces approches multicritères peuvent contribuer à l'amélioration du processus de conception Architecturale. Elles sont un outil pour une conception rationnelle où toutes les données doivent s'intégrer naturellement dans la démarche du projet architectural.

Devant un ensemble discret d'alternatives décrit par une série de critères, il y a quatre types différents d'analyse qui peuvent être utilisés pour l'aide à la décision :

- identifier la meilleure alternative ou sélectionner un nombre limité de meilleures alternatives (problème de choix) ;
- classer les alternatives selon des groupes homogènes prédéfinis (problème de sélection ou tri) ;
- construire un rangement « ranking » d'alternatives en allant des meilleures vers les moins bonnes (problème de rangement) ;

- identifier les aspects principaux des alternatives et les décrire selon ces aspects (problème de description) ;

Pour le cas spécifique de décider parmi plusieurs alternatives de projet, il est prudent de considérer le problème de décision selon le type « rangement ». Ceci garantit que le résultat du processus décisionnel retiendra plus d'informations qu'un processus de choix, qui élimine toutes les autres alternatives.

L'étude du processus de conception architecturale a révélé que la compréhension des modes de raisonnement des architectes ainsi que les différents éléments qui composent le processus de conception en architecture est essentiel afin de proposer des outils et méthodes efficaces.

On a vu que la conception est un mélange de raisonnement technique et rationnel et une sorte d'intuition. Cette intuition est incarnée dans la connaissance et l'expérience de l'architecte. Elle est également un processus de décision dialectique dans le sens où il y a une conversation entre l'architecte et lui-même à travers le dessin. Ce processus est cyclique ou itératif, où les solutions et les critères sont explorés et raffinés de façon continue.

Nous avons vu que la conception en architecture se situait dans la catégorie des problèmes mal-définis, en ce sens qu'elle ne comporte pas une solution unique pouvant être obtenue grâce à une méthode garantissant l'atteinte de cette solution. Les solutions de la conception ne sont pas exhaustives et holistiques. Autrement dit, il n'y a pas une solution optimale à un problème de conception mais plutôt une solution acceptable et satisfaisante qui répond le mieux aux exigences et contraintes du projet architecturale.

Il est à noter également que la conception architecturale impliquent des problèmes de décision complexes ce qui implique des critères multiples et conflictuels qui ont besoin d'être combinés pour l'obtention d'une solution idéale. Augmenter la dimension des fenêtres par exemple, signifie non seulement utiliser plus de lumière naturelle dans les environnements, mais aussi augmenter la charge thermique à l'intérieur du bâtiment. Les méthodes de conception proposées par les différents chercheurs ont un caractère simpliste et ne prennent pas tous les critères du projet architectural. En plus, elles présentent une complexité dans leur application et ne fournissent pas un appui méthodologique pour l'architecte devant sa table de dessin.

Pour ce faire, une approche multicritère est exigée pour évaluer la « qualité » globale d'une solution architecturale proposée. En plus, plus nous avançons dans le processus de conception, plus la quantité d'informations à notre disposition est grande. Cependant, au fur et à mesure que nous cheminons dans ce processus nous nous éloignons des décisions importantes. Pour cette raison, Il nous semble primordial de viser la phase de l'esquisse pour

l'élaboration de futurs outils d'aide à la décision et la conception afin que les choix des concepteurs gagnent en efficacité. Cela permettrait de rester sur des solutions plus faciles à optimiser aux phases ultérieures du processus de projet. Au fur et à mesure que le projet architectural se conçoit, il devient de plus en plus difficile et onéreux de le modifier. Comme présenté précédemment, il est logique de proposer des aides dès la phase d'esquisse, le principal intérêt étant d'éviter des erreurs de conception pouvant compromettre la qualité future du bâtiment.

Après avoir étudié la conception architecturale en général et pour avoir une compréhension approfondie de l'intégration du paramètre « climat » dans la conception architecturale, on a étudié également les méthodes de conception dites systémiques qui tentent d'intégrer le savoir climatique dans le processus de conception architecturale dans sa totalité. Après avoir analysé ces méthodes, on est arrivé à la conclusion que les phases premières de la conception sont les plus importantes pour intégrer le savoir climatique et chaque décision de l'architecte pendant ces phases aura des répercussions soient négatives ou positives sur le comportement du bâtiment (énergétique, thermique, lumineux...etc.). Il est à noter également que les méthodes systémiques analysées revêtent un caractère simpliste et linéaire et ne reflètent pas le caractère holistique et cyclique de la conception architecturale. Ainsi, Ces méthodes négligent les autres variables de la conception à savoir les variables fonctionnelles, esthétiques, sociologiques, économiques, religieuses...etc. au profit de quelques variables climatiques. C'est pour ça, il faut prendre tous les paramètres interagissant, et seule une approche synthétique et holistique conduira à un résultat satisfaisant. L'architecte doit donc traiter simultanément tous les problèmes et les variables impliquées dans le projet architectural sans chercher à optimiser individuellement chacun des paramètres, mais il doit viser plutôt un optimum global.

Au contraire des méthodes systémiques, l'approche récente de la conception intégrée a présenté un caractère holistique, multidisciplinaire, cyclique et flexible ce qui permet l'intégration des outils d'aides à la décision, voir les approches multicritères. Ces dernières conduisent et guident l'architecte lors du processus de conception. Elles prennent le caractère holistique de la conception architecturale.

La conception bioclimatique avait été abordée à travers les différentes stratégies conceptuelles à suivre par l'architecte ainsi que la notion du climat en détail. On a vu que l'architecture bioclimatique n'est pas une invention nouvelle, elle n'est qu'une redécouverte de principes très anciens relevant de l'architecture vernaculaire. L'architecture bioclimatique cherche un équilibre entre l'homme, l'habitat, le milieu physique (climat, environnement, etc.) et les modes et rythmes de vie des habitants. L'homme du passé a observé les influences du

milieu physique qui lui étaient favorables et a produit un type de construction à bien des égards exemplaires. Il est à noter que ces derniers nous donnent des leçons gratuites sur les stratégies conceptuelles employées pour réaliser une construction bioclimatique. L'architecte doit maîtriser les stratégies de la conception bioclimatique en utilisant à son avantage le climat et l'environnement et composer avec ces derniers et non se battre contre eux.

L'architecture bioclimatique est déterminée par une série de facteurs dont un seul ne varie jamais, le climat. Il est à noter que les variables climatiques sont déterministes et inchangeables et souvent interactives et conflictuelles ; ce qui rend leur intégration dans le processus de conception dans sa totalité difficile. Intégrer l'ensemble de ces contraintes en préalable à la conception architecturale est indispensable pour réussir le projet architectural. De ce fait, l'architecte doit avoir une bonne connaissance et maîtrise de ces variables.

Après avoir analysé la conception architecturale, les méthodes systématiques et la conception bioclimatique, on a analysé en détail les méthodes multicritères. On a vu que la conception architecturale est un processus de prise de décision complexe. Elle implique des critères qualitatifs et des critères quantitatifs ainsi que des acteurs de différentes disciplines. L'utilisation des méthodes multicritères permet aux décideurs de prendre en compte tous les critères qualitatifs et quantitatifs impliqués dans le processus de la conception architecturale et aux membres de l'équipe du projet de révéler leur choix, intentions et jugements ce qui favorise la transparence et la multidisciplinarité. Elle permet également d'avoir une vue d'ensemble afin d'effectuer des choix judicieux dans le projet architectural ce qui aide les architectes d'avoir une évaluation globale de la qualité et la performance des solutions architecturales et s'assurer que tous les critères soient considérés. Elles sont susceptibles d'aider les concepteurs en architecture dès les premières phases de conception de bâtiments, en permettant également la comparaison simple et rapide de différentes solutions architecturales. De ce fait, elles se voient en tant que outils d'aide à la décision et la conception plus qu'une méthode de conception ou une alternative aux anciennes méthodes de conception.

Par la structuration de l'objectif par rapport aux différents critères, la transparence de la situation augmente et tous les dimensions des critères ainsi que leurs interdépendances sont développées et considérées, ce qui mène à une meilleure considération de tous les aspects dans le processus de l'évaluation des alternatives. La technique de la comparaison par paire semble être utile pour comprendre le problème de conception en détail. De ce fait, il est très important que la méthode ne doive pas être employée de manière erronée pour prendre la décision finale.

La plupart des méthodes sont assez compliquées et exigent une compréhension mathématique (Electre...etc.) ce qui rend leur utilisation assez difficile pour les architectes. Cependant, il y a des méthodes simples qui pourraient être intégrées facilement dans le processus de la conception architecturale comme le cas de la méthode « Simple additive weightig » (SAW). Cette dernière, du fait que l'architecte n'a pas un temps suffisant pendant la phase de l'esquisse et n'est pas assez familiarisé avec les méthodes multicritères, semble la plus adéquate surtout quand les critères impliqués dans la conception du projet architectural sont mutuellement indépendants.

Les méthodes multicritères ont accès aux différentes disciplines (Transport, économie, recherche opérationnelle...etc.) mais dans le domaine de l'architecture elles n'ont pas encore attiré l'attention des concepteurs et chercheurs du domaine.

Vu que le problème de décision dans la conception des bâtiments est considéré comme étant un problème de rangement pour identifier la meilleure solution architecturale « optimale » parmi N solutions. On a défini l'ensemble des actions potentielles qui seront considérées dans la procédure de décision. Dans ce travail c'est l'ensemble de toutes les solutions possibles, désirées et imaginées par l'auteur du projet. Dans la réalité, la plupart du temps, le nombre de solutions architecturales est restreint par des facteurs comme des normes, le temps, la typologie, les références culturelles, etc. Puis, on a défini les critères qui doivent être considérés au long de la procédure de décision. Ces critères sont des expressions qui permettent de juger les solutions architecturales. Aux critères est associée une échelle de valeurs. Tous les critères n'ont pas la même importance et différents poids ont été attribués à eux. Dans ce travail, on a considéré cinq critères pour l'évaluation des solutions de projet. Donc, ces cinq critères seront utilisés pour définir les performances individuelles de chaque solution de projet définie dans la première étape du processus de décision. Une application de la méthode a été réalisée en considérant un modèle virtuel d'une école primaire à Biskra. La ville Biskra a été choisie comme exemple parce qu'on désirait étudier une situation de climat chaud et aride. Les simulations nécessaires ont été exécutées et les courbes de tendance ont été obtenues, en démontrant la viabilité du processus.

La méthode retenue « SAW » a servi comme un outil d'aide à la conception et d'interaction entre le concepteur et le processus d'évaluation des solutions architecturales. Nous avons cherché à appliquer une méthode simple et adéquate pour l'utilisation par des architectes. Nous croyons que cette approche, par ses caractéristiques, représente une grande contribution dans la recherche de bâtiments durables du point de vue environnemental, pour assister, alors que l'on se trouve encore dans la phase d'avant-projet, à la prise de décision.

La méthode « SAW » est tout à fait flexible. Le cas d'étude a prouvé que la méthode pourrait facilement incorporer différents types de critères conflictuels ou non. Cela est un grand avantage de la méthode parce qu'elle supplantait les difficultés liées à l'inexistence de compromis et de combinaisons entre les différents critères dans les méthodes de conception décrites dans le chapitre un et trois. La méthode soutient le caractère holistique de la conception architecturale. Les échelles de mesure standards, les techniques de pondération et de normalisation fournissent une référence commune pour arriver à un compromis concernant les stratégies de conception. Ainsi, la méthode permet de s'assurer que tous les critères avaient été pris en considération, ce qui érige la méthode considérée comme alternative aux méthodes anciennes simplistes de la conception architecturale.

Il est à noter également que la méthode peut également fonctionner pour différents types de projets architecturaux impliquant différents types de personnes et cela est un acquis important aussi de la méthode parce qu'elle encourage le discours transparent et explicite entre les membres de l'équipe de la conception. Par exemple la pondération explicite pourrait aider à ouvrir les boîtes noires « black boxes » entre les membres de l'équipe de conception ainsi qu'entre eux et le client et les usagers. Cela pourrait également promouvoir le transfert du savoir et l'évaluation totaliste d'une solution architecturale. Aussi, elle fournit à ces membres une bonne maîtrise et compréhension des critères choisis et la nature du problème. La méthode pourrait nous aider également à mettre l'accent sur les critères les plus importants pour l'architecte. Le cas d'étude a révélé que les techniques de pondération facilitent cette tâche.

La méthode pourrait être intégrée aussi dans les différentes étapes du processus de conception architecturale mais il est recommandé qu'elle soit appliquée dans les phases primaires ou initiales de la conception à savoir la phase de l'esquisse parce que c'est là où les décisions de l'architecte et les autres membres de l'équipe de conception ont un grand impact sur tout le cycle de vie du projet architectural.

Malgré les échelles de mesure, les techniques de pondération et de normalisation ont l'air étrange pour les architectes, la méthode proposée est une méthode très simple, facile à comprendre et ne consomme pas beaucoup de temps si une petite explication de la méthode est fournie.

Il est possible aussi d'affirmer que les méthodes multicritères sont un préalable pour des approches interdisciplinaires. Sans elles, il est très difficile, voir impossible d'adresser des dimensions et des critères multiples. La matrice d'évaluation ne pourrait pas être développée sans elles.

Limites de l'approche suggérée et perspectives futures :

- L'analyse multicritère proposée se veut plus globale possible mais vu le temps limité nous avons choisi seulement cinq critères et trois paramètres. Nous espérons dans des futures recherches aborder un très grand nombre de critères et de paramètres.
- Un très grand nombre de simulations est nécessaire pour la détermination des graphes de comportements et ce nombre augmente dans la mesure de l'augmentations des paramètres et critères considérés. Ce problème peut être traité grâce à une analyse plus détaillée des courbes de tendance, pour vérifier s'il y a quelques alternatives typiques de projet qui présentent des comportements qui puissent, sans grand préjudice, être utilisées pour toutes les autres solutions de projet.
- Les graphes et les données obtenus sont utilisables seulement pour la typologie architecturale retenue et les conditions climatiques considérées dans les simulations. Ceci dit que pour chaque type de projet et de climat étudié, un nouveau groupe de simulations doit être exécuté. le problème de la spécificité des typologies peut être résolu en créant une banque de données dans des futures recherches contenant les courbes de tendance pour une grande variété d'immeubles et de conditions climatiques, qui peuvent être accédées, alors, par le logiciel d'aide à la conception développé.
- La méthode a été testée par un seul cas d'étude ; ce qui réduit la crédibilité des résultats et, de ce fait, plusieurs cas d'études seraient recommandés dans des futures recherches. Ainsi, dans ce travail, on a employé uniquement la méthode « SAW ». Nous espérons dans des futures recherches employer plusieurs méthodes multicritère
- La littérature limitée concernant le sujet des approches multicritères en architecture ainsi que leur background mathématique ont rendu difficile notre compréhension de ces approches.

BIBLIOGRAPHIE :

1. Akadiri. P, Development of multi-criteria approach for the selection of sustainable materials for building projects, Thèse de doctorat, University of Wolverhampton, February 2011.
2. Alain. L et André D. H, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Observ'ER, Paris, 2005.
3. Alexander. C, De la synthèse de la forme, Dunod, Paris,1971.
4. Almusaed. A, Biophilic and Bioclimatic Architecture, Springer-Verlag, London,2011.
5. AL-Shibami. F, “ Formulating Passive Measures to Achieve Thermal Comfort and Energy Efficiency in Yamen Hot Dry Region” ,ICCBT, 2008. pp201-208.
6. Anay. H, Two evolutionary models for reconceptualizing architectural ideas and the architectural design process, Thèse de doctorat, Middle east technical university,2008.
7. Andy. L, passive solar design, energetechs, document pdf , 2009.
8. Andresen. I, A Multi-Criteria Decision-Making Method for Solar Building Design, PhD-dissertation, the Norwegian University of Science and Technology, Norway,2000.
9. Anir K. U, Thermal mass requirement for building envelope in different climatic conditions, 14th International Brick & Block Masonry Conference, Sydney, Australia, February 17-20, 2008.
10. Arrouf et Bencasi, « Modélisation du processus de conception : Etude expérimentale du système compositionnel », Courrier du Savoir, N°07, Décembre 2006, pp.59-65.
11. Baumann. O, “Integrated Design –Delivery and Operations of Net-Zero Energy Buildings”, Building Industry Day Workshop Washington, D.C. -October 15, 2009.
12. Bayazit. N, “ Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research” , Design Issues: Volume 20 , Number 1, P. 19, 2004.

13. Ben Cheikh. A, Impact de la conception des salles de classe sur l'ensoleillement, le confort visuel et le comportement des écoliers. Mémoire de Magistère, Université Biskra, 2006.
14. Bilge G. C and Sharmin. A, "A Conceptualization for Using Analytical Hierarchy Process in Green Building Market Research", 48th ASC Annual International Conference Proceedings , the Associated Schools of Construction, 2012.
15. Birol. T, Solar envelope and form generation in architecture, Master of architecture thesis, The Middle East Technical University, September 2003.
16. Board of International Research in Design BIRD, Design research now: Essays and Selected Projects, Ralf Michel (ed.) Birkhäuser Verlag AG, Berlin, Germany 2007.
17. Bonnardel. N, « Activités de conception et créativité : de l'analyse des facteurs cognitifs à l'assistance aux activités de conception créatives », Presses Universitaires de France, Volume 72, 2009.
18. Boudon. P, et al, Enseigner la conception architecturale, Paris , La Villette,1994).
19. Bridges A. H. , "Any progress in systematic design? ", CAAD FUTURES DIGITAL PROCEEDINGS,Ch1, 1986, P. 5-15.
20. Broadbent. J, Design in Architecture: architecture and the human sciences, David Fulton publishers, Great Britain,1988.
21. Buchanan. J et al, Project ranking using ELECTRE III, 1999.
22. Bürdek. B. E, Design, History,Theory and Practice of Product Design, Birkhäuser,2005.
23. Çacri. Ç, Assessing thermal comfort conditions, Master thesis, Middle East University, December, 2006.
24. Cañas. I, et al., Bioclimatic passive designs rural buildings, International conference on Innovative Methods in Product Design, Venice, Italy, June 15th – 17th, 2011

-
25. Catalina.T, Estimation of residential buildings energy consumptions and analysis of renewable energy systems using a multi-criteria decision methodology, these de doctorate, L'institut nationale des sciences appliqués de Lyon, juillet 2009.
26. Chatelet. A et al, Architecture climatique : une contribution au développement durable. Tome2 : concepts et dispositifs, Aix-en-Provence, France, Édisud, 1998.
27. Chupin. J.P, Judgement by design: "Towards a model for studying and improving the competition process in architecture and urban design", Scandinavian Journal of Management ,2011, 27, 173-184
28. Citherlet. S, "Towards the Holistic Assessment of Building Performance Based on an Integrated Simulation Approach", Phd thesis, Swiss Federal Institute of Technology (EPFL),2001.
29. Clarkson. J, et Eckert. C, Design process improvement :A review of current practice, Springer-Verlag, London, 2005.
30. Claudio V. F, The sun, Natural History Museum, London, UK, 2008.
31. Daniel E. W, Sustainable Design, Ecology architecture ,and planning , John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey,2007.
32. De Asiain. A, et al, "Reflections on the Meaning of Environmental Architecture in Teaching", The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands, 19 – 22 September 2004, P.1-6.
33. Dehlinger. J et Dehlinger. H, Architecture, design methods and Inca structures :Festschrift for Jean-Pierre protzen, Kassel university press,2009.
34. De Montis. A. et al, "Criteria for quality assessment of MCDA-methods". 3rd Biennial Conference of the European Society for Ecological Economics. Vienna, 3-6 May. 2000.
35. Department for Communities and Local Government, Multi-criteria analysis: a manual, London, 2009.
36. Diaby. M et al, « Utilisation d'une méthode multicritère d'aide à la décision pour le choix des clones d'hévéa à planter en Afrique », Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2010, 14 (2), 299-309.

-
37. Donnadiou. C et al, Habiter le désert : les maisons mozabites, pierre mardaga éditeur, 1986.
38. Eduardo Breviglieri Pereira de Castro , Méthodes d'aide à la conception architecturale basée sur l'analyse multicritère et sur les données simulées des comportements des bâtiments, Thèse de doctorat, L'institut nationale des sciences appliquées de Lyon et l'université fédérale de Rio de Janeiro, 2005.
39. Elnaz A.T et al, “ Multi-criteria Design Evaluation and Optimization of School Buildings Using Artificial Intelligent Approaches”, Construction Research Congress , 2012.
40. Evans. J. M, The comfort triangles: a new tool for bioclimatic design, Thèse de doctorat, Delft University, 2007.
41. Fathy. H, Construire avec le peuple, Sindbad ed., Paris, 1970.
42. Fehmi. D, The role of conceptual diagrams in the architectural design process, Thèse de Doctorat, Georgia institute of technology, USA 2003.
43. Fernandez. L, Transposition en architecture des connaissances d'ingénierie environnementale et des savoirs relatifs au choix des matériaux, Thèse de doctorat, Université de Toulouse. 2010.
44. Gay. J, « Fenêtres et protections solaires », Cours du Master en Architecture et Développement Durable, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001.
45. Ginting. R, intégration du système d'aide à la décision multicritères et du système d'intelligence économique dans l'ère concurrentielle, Thèse de Doctorat, l'Université de droit et des sciences d'Aix-Marseille, 2000.
46. Givoni. B, L'homme, L'architecture et le climat, édition le Moniteur, paris, 1978.
47. Haapasalo. H, Creative computer aided architectural design: An internal approach to the design process, Department of Industrial Engineering, Academic Dissertation, University of Oulu, Finland.2000.
48. Haigh J. D. et al., The sun, solar analogs and the climate, Swiss society of astrophysics and astronomy, 2004
49. Hans. R,” Climatic Design of Buildings using Passive Techniques”, Building Issues, Volume 10 ,N1, 2000.

-
50. Hansen. H et Knudstrup. M, The Integrated Design Process (IDP) – a more holistic approach to sustainable architecture. The World Sustainable Building Conference, Tokyo, 2005, 27-29.
51. Hassoun, K, L’abduction en conception architectural : Une sémiologie hypostatique, Thèse de doctorat, Faculté d’aménagement, d’architecture et des arts visuels, Université Laval, Québec 2010.
52. Harruttugil. Te et al, “conceptual framework for potential implementations of multi-criteria decision making (MCDM) methods for design quality assessment”, Management and Innovation for a Sustainable Built Environment ISBN, 23 June 2011, Amsterdam, The Netherlands.
53. Heiselberg. P, Integrated Building Design. DCE Lecture Notes, No. 017, Aalborg University. December 2007.
54. Hugh. H, How do u design , Dubberly Design Office, San Francisco,USA,2004.
55. Hwang C. L. and Yoon. K, Multiple Attribute Decison Making - Methods and Application: A State of the Art Survey. Berlin, New York: Springer,1981.
56. Hyde. R(ed), Bioclimatic Housing, Innovative designs for warm climates, USA , 2008.
57. Hyde K. M, Uncertainty analysis methods for multicriteria decision analysis, Thèse de doctorat, Adelaide University, May 2006.
58. Jin Su. J et al, “A Spatial Assessment for Re-Mixing Buildings on the Rural Fringe of Spain”, Proceedings REAL CORP ,Tagungsband, 14-16 May ,2012.
59. John. E. O, Encyclopedia of World Climatology, Springer, The Netherlands,2005.
Samuel. C. et Jean-Pierre. O, La conception bioclimatique, Terre vivante, Mens, France, 2007.
60. Jones. J, Design Methods: Seeds of Human Futures, Wiley-Interscience, London, UK, 1970.
61. José Figueira et al (ed), Multiple criteria decision analysis : State of the art surveys, Springer Science + Business Media, Inc., Boston, 2005.

-
62. Kowaltowski et al, Methods that may stimulate creativity and their use in architectural design education, Int J Technol Des Educ, Springer Science+Business Media B.V. 2009.
63. Laaroussi. A, Assister la Conduite de la Conception en Architecture: Vers un système d'information orienté, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.
64. Lawson. B, How designers think, 4th ed, Elsevier, Oxford, 2005.
65. Lawson. B, what designers know, Elsevier,2004.
66. L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF), L'architecture bioclimatique, janvier 2008.
67. Löhnert, G., Dalkowski, A., Sutter, W. Integrated Design Process – A Guideline for Sustainable and Solar-optimized Building Design. Berlin/Zug, April 2003
68. Lomas. K, et al. “Building bioclimatic charts for non-domestic buildings and passive draught evaporative cooling” , Building and Environment, ,2004, 661 – 676.
69. Los Alamos National Laboratory Sustainable Design Guide, December 2002.
70. Machado. R et all, “The use of a mathematical multi-criteria decision-making model for selecting the fire origin room”, Building and Environment 43 ,2008, 2090–2100.
71. Magarian. D, “Building with the desert: place conscious architecture at burning man” , Master of Liberal Studies, Northern Arizona University, August 2007.
72. Massam B. H, “Multi-criteria decision making (MCDM) techniques in planning”, Progress in Planning, 30 (Part 1),1988.
73. Marin. P, Exploration des mécanismes évolutifs appliqués à la conception architecturale, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) ,2010.
74. Marin. P, « Outils d'évaluation des qualités solaires passives du bâtiment ;exploration des mécanismes de la conception révolutionnaire », MAP ARIA CRAI, UMR n°694/CNRS/CULTURE.

-
75. Marin. P et al, outil révolutionnaire d'aide à la conception architecturale creative, CAAD futures, Montréal, 2009.
76. Mat Santamouris (Ed) ,Environmental design of urban buildings : An Integrated Approach, Earthscan,London,UK, 2006.
77. Mazouz. S, Eléments de conception architecturale, Alger: Edition O.P.U, Juillet, 2004.
78. Mazouz. S et Zerouala. , the integration of environmental variables in the process of architectural design: the contribution of expert systems, Building and Environment, 33,2001,699-710.
79. Memariani. A et al, “Sensitivity Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW):The Results of Change in the Weight of One Attribute on the Final Ranking of Alternatives”, Journal of Industrial Engineering 4, 2009, 13- 18.
80. Michael. B et al, Green Building – Guidebook for Sustainable Architecture, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
81. Michael. D et Constantin. Z, Multi-criteria Decision Aid Classification Methods, Kluwer Academic Publishers,USA,2004.
82. Ministry for the Environment, Passive Solar Design Guidance, Wellington, New Zealand, 2008
83. Mir B. Arya Nezhad et al, “Using Multi-Attribute Decision Making For Designing Revised Balanced Scorecard In National Iranian Oil Products Distribution Company”, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(8): 1151-1162, 2011.
84. Moeffaert D. V, Multi Criteria Decision Aid in Sustainable Urban Water Management, Thèse de doctorat, Stockholm 2002.
85. Mokhtari. A et al, « Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°2 , 2008, 307 – 315.
86. Munda. G, Multicriteria Evaluation in a Fuzzy Environment. Heidelberg: Physica Verlag,1995.

-
87. Munda. G et al. "Environmental Decision Making: A Comparison Between Cost-Benefit Analysis and Multicriteria Decision Aid". In S. Faucheux, M. O'Connor and J. van der Straaten (Eds.), *Sustainable Development: Concepts, Rationalities and Strategies*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 227-238, 1998.
88. Mysiak. J, MDSS Decision Methods, mDSS version 5 guide, September 2010.
89. Nahla. E , Bioclimatic architecture in Libya: case studies from three climatic regions, Master's thesis, Middle East Technical university, 2007.
90. Nigel. C, Designerly Ways of Knowing, Birkhäuser, 2007.
91. N. Cross, "Forty Years of Design Research" , Design Research Society, Wonderground 2007 Plenary, P.3.
92. Nigel. C, "Science and Design Methodology": A Review, Research in Engineering Design , 1993, 5:63-69.
93. Olgyay. V, Design with climate, Princeton University Press, New Jersey, 1963.
94. Olu Ola, O et Bogda P. O, "Defining Climatic Zones for Architectural Design in Nigeria: A Systematic Delineation", Journal of Environmental Technology , 1(2), 2002, P. 1 – 14.
95. Omann ,I, Multi-criteria decision aid as an approach for sustainable development analysis and implementation, thèse de doctorate, der Karl-Franzens Universität, 2004.
96. Danae. D et Stelios. G, Multi-criteria Analysis, Final Report, 2004.
97. Özcan. T et al, "Comparative Analysis Of Multi-Criteria Decision Making Methodologies And Implementation Of A Warehouse Location Selection Problem". Expert Systems with applications, 2011.P.2-22, 2011.
98. Passive Solar Addendum, document pdf, See <http://code.pediapress.com/>, 08 Mar 2011.
99. Pedrini. A, Integration of low energy strategies to the early stages of design process of the office buildings in warm climates, Thèse de doctorat, University of Queensland, 2003.
100. Pierre. F. Et Pierre. L, Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements et méthodes, Le moniteur, Paris, 2009.

-
101. Pierre. L, Architecture climatique, ÉDUSUD, Aix-en-Provence, 1994.
102. Reymen. I, Improving Design Processes through Structured Reflection A Domain-independent Approach, Thèse de doctorat, Eindhoven Technische Universiteit Eindhoven, The Netherlands 2001.
103. Rittel. H, et Webber. M, Planning problems are wicked problems, Policy Sciences, 4(2): P 155–169, 1973.
104. Roberto. G et Karl J. H, Architecture et efficacité énergétique, principes de conception et de construction, Birkhauser Verlag AG, Berlin, Allemagne, 2008.
105. Roulet. C et al. “ORME: A multi-criteria rating methodology for buildings”, Building and Environment 37 2002, 579 – 586.
106. Roy. B, “Decision-Aid and Decision-Making”, European Journal of Operational Research 45, 1990, 324-331.
107. Roy. B. and Vanderpotten. D, The European School of MCDA: Emergence, Basic Features and Current Works. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis 5,22-38, 1996.
108. Roy. B and Vincke. P. “Multicriteria Analysis: Survey and New Directions”. European Journal of Operational Research 8, 207-218,1981.
109. Ruud BINNEKAMP.D, Reference-based design in architecture, Thèse de Doctorat, Delft technical university,2010.
110. Saaty,T.L., The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.
111. Scaletsky. C. C, Rôle des références dans la conception initiale en architecture : Contribution au développement d’un Système Ouvert de Références au Projet d’Architecture le système « kaléidoscope », Thèse de doctorat, Ecole d’Architecture de Nancy, 2003.
112. Şener. B, Landfill site selection by using geographic information systems, Master of science in geological engineering, The graduate school of natural and applied science of middle east technical university, 2004.

113. Silvestri. C, Perception et conception en architecture non-standard, Une approche expérimentale pour l'étude des processus de conception spatiale des formes complexes, Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2009.
114. Silvio. G et Ulrich. D, Architecture vernaculaire, presses polytechniques et universitaires romandes, suisse, 1990.
115. Simon. H. A, The structure of ill-structured problems, Artificial Intelligence, 4, P 181-201, 1973.
116. Sopa. V and Jeff. S, « An analysis of design strategies for climat-controlled residences in selected climates », IBPSA-USA National Conference Boulder, CO, August 4-6, 2004.
117. Sreshthaputra. A, Building design and operation, for improving thermal comfort in natural ventilated buildings in hot humid climate, Thèse de doctorat, Texas A&M University, USA, 2003.
118. Stankevičienė. J, “Valuation model of new start-up companies: Lithuanian case”, 2012, P.240–249.
119. Szokolay. S, Introduction to architectural science, the basis of sustainable design, Published by Elsevier, 2008, P.22
120. Szokolay, S et Auliciems, A, Thermal comfort, The University of Queensland, 2007
121. TERI et TVPL , Environmental Building Guidelines for Greater Hyderabad , 2010.
122. Thierry. S, « Architecture solaire et conception climatique des bâtiments Site Internet » , Architecture et énergies renouvelables" réalisé par l'Agence Méditerranéenne de l'Environnement (AME) et l'Ordre des Architectes du Languedoc-Roussillon, 25/05/2000.
123. Thomas. F, Micrometeorology, Carmen J. Nappo, Germany, 2008.
Markus T. A. and Morris E. N., Buildings, climate and energy, Pitman Publishing Limited, London, 1980.
124. Tsoukias. A, From Decision Theory to Decision Aiding Methodology. DIMACS Rutgers University. Technical Report, 2003.

125. Visitsak. S, An evaluation of the bioclimatic chart for classifying design strategies for a thermostatically-controlled residence in selected climates, Thèse de doctorat, Texas A&M University, 2007.
126. Visser. W, La conception : de la résolution de problèmes à la construction de représentations, Presses Universitaires de France, Volume 72, , P. 61-78, 2009.
127. Walter W. K, A Spatial Multi-criteria Decision Analysis Approach for Evaluating Sustainable Development, Master of Art, the College of Arts and Sciences of Ohio University, USA, 2010.
128. YÜNCÜ. O, Research by design in architectural design education, Thèse de doctorat, Middle East Technical University, 2008.
129. Yung. Y, “Multi-criteria decision making for urban built heritage conservation: application of the analytic hierarchy process “, Journal of Building Appraisal, VOL.4 NO.3, PP 191–205, 2009 .
130. Zeiler. W et al., “Integral design to enhance climate equipment performance: Flexergy”, Proceedings of the Eighth International Conference for Enhanced Building Operations, Berlin, Germany, October 20-22, 2008
131. Zeroual. D, Impacts des gains de chaleurs sur la morphologie des bâtiments, Thèse de magistère, Université de Constantine, 2006.

Sites internet :

<http://www.wmo.int>

<http://www.hespul.org/L-architecture-bioclimatique.html>

www. Wikipédia.2011

Annexe 1

Type de la stratégie de refroidissement		caractéristiques		
Refroidissement par ombrage efficace	Ombrage par agglomération des volumes		création de différents volumes, qui aident en produisant un ombrage nécessaire pour le refroidissement	
	Ombrage par les patios		- concevoir des patios avec deux étages pour créer assez d'ombrage sur des murs du patio. -réduire la température efficace en neutralisant le rayonnement et en maintenant les surfaces de murs externes entouré le patio relativement à un à basse température	
	Ombrage par le concept d'espace en espace		Un volume qui sert comme une enveloppe, un espace de transitions pour les stores et les services et un volume pour les fonctions principales	
	Ombrage par les éléments naturels	Les arbres		Ombrage sur les toits et les murs. les arbres pompent l'eau de la terre dans leurs feuilles. et cela refroidit le bâtiment Arbres caduques sont plantés devant la façade sud les arbres persistants sont plantés devant les façades nord et nord ouest
		Les arbustes		Moins d'ombrage que les arbres mais atteindre la taille mûre plus rapidement et exiger moins d'espace.
	Ombrage par dispositif	Dispositif interne		moins efficace que les dispositifs extérieurs réduire l'infiltration de la chaleur solaire. de couleur claire pour réduire l'éblouissement
		Dispositif externe	avancée	bloquer le soleil d'été, dont les rayons sont hauts et permettre les rayons bas d'hiver
			auvent	bloquer les rayons hauts du soleil
treillis			Ombrage partiel sur les murs extérieurs Les plantes grimpantes s'élevant sur les treillis ajoutent plus d'ombrage et de refroidissement évaporatif	
écran	empêcher le soleil d'entrer dans une fenêtre			
Ombrage par ventilation	Ventilation par une boucle ouverte		la température externe est au-dessous de la température d'intérieur	
	Ventilation par une boucle fermée		circuit fermé. Le circuit pénètre un autre milieu séparé qui est plus froid	
Refroidissement par système évaporatif direct	Végétation, fontaines, piscines et bassins. Tour de vent		Ce système se base sur l'humidité rajouté à l'écoulement d'air	
Refroidissement par système évaporatif indirecte	L'eau de toit vaporisatrice		La chaleur sensible sur la surface de toit est convertie en chaleur de la vaporisation latente pendant que l'eau s'évapore	
	Etang de toit placé sur une zone non-ensoleillée		L'évaporation de l'eau à l'atmosphère sèche se produit pendant le jour et la nuit par le biais du plafond	
	Paroi frontale perforée (paroi construit par un sable mouillé) qui fonctionne par le phénomène de la capillarité		L'air chaud passant devient frais par le biais de la paroi	
	Réservoir d'eau froide		L'air chaud passe à travers le réservoir pour attraper la fraîcheur avec l'aide d'un ventilateur d'extraction	

Tableau 2.6 Les différentes stratégies du refroidissement évaporatif. . Réadapté par autour. Source: Almusaed (2011)