



Université de Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

DESIGN PARAMETRIQUE : OUTIL D'AMELIORATION DU CONFORT
THERMIQUE EXTERIEUR EN CLIMAT ARIDE

MEMOIRE

Présenté pour l'Obtention du
Diplôme de Magistère
en Architecture Bioclimatique

Par
Mohammed LAMINE

Année Universitaire
2021-2022



Université de Constantine 3
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme
Département d'Architecture

N° de Série :

N° d'Ordre :

DESIGN PARAMETRIQUE : OUTIL D'AMELIORATION DU CONFORT
THERMIQUE EXTERIEUR EN CLIMAT ARIDE

MEMOIRE

Présenté pour l'Obtention du
Diplôme de Magistère
en Architecture Bioclimatique

Par

Mohammed LAMINE

Devant le Jury Composé de :

ROUAG Djamila	Présidente	Professeur	Université Constantine 3
BOURBIA Fatiha	Rapporteur	Professeur	Université Constantine 3
KORICHI Amar	Examineur	Professeur	Université Constantine 3
HAMOUDA Abida	Examineur	MCA	Université Batna

Année Universitaire

2021-2022

DEDICACES

Je dédie ce travail avec toute ma gratitude,

À mes très chers parents ; pour leur amour, leurs encouragements et leur soutien, et surtout leur patience durant toutes ces années. Que dieu vous garde et vous protège inchaa Allah.

A mon cher frère Imed, ma chère sœur Hadda, et mon petit neveu Yazan.

A tous ceux qui m'ont aidé, soutenu et encouragé pour la réalisation de ce mémoire

Mohammed

REMERCIEMENTS.

Après ALLAH, le tout puissant que je remercie toujours et en premier lieu,

Je tiens à remercier vivement mon encadreur Prof. Fatiha BOURBIA- directrice du laboratoire Architecture Bioclimatique et Environnement (ABE)- d'avoir soigneusement dirigée ce travail et d'avoir été toujours à l'écoute faisant preuve d'encouragement, de patience, de générosité et de soutien à chaque instant envers moi, surtout pour ses conseils précieux et judicieux, son optimisme contagieux et pour son désir de m'ouvrir les horizons au monde de la recherche.

Je tiens aussi à remercier Dr. Nassira BENHASSINE TOUAM et Mme. Nadia NAIT pour les énormes efforts qu'elles ont déployé pour m'aider recherche.

Je remercie chaleureusement mes amis Hicham HADBAOUI et Cherif BENBACHA et Islam BOUKHELKHAL

Mes remerciements les plus sincères vont également à toute l'équipe du laboratoire ABE ; à tous mes enseignants ainsi qu'à tous mes collègues de la Post-Graduation - Option : Architecture Climatique et Environnement (ACE) - pour avoir fait de la formation une expérience passionnante.

Je remercie les membres du jury d'évaluation.

Je remercie enfin tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Sommaire

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé

Table des matières	I
Liste des figures	V
Liste des tableaux.....	IX

Introduction générale

Introduction	1
Problématique	3
Objectif de la recherche	4
Hypothèse.....	5
Méthodologie de la recherche	5
Outils d'investigation	6
Structure du mémoire	6

Chapitre I

Microclimat urbain et confort thermique : Apport du Design Paramétrique

Introduction	8
I.1. Microclimat urbain altéré : exigences urgentes	9
I.1.1. Réchauffement climatique : un constat alarmiste.....	9
I.1.2. Îlot de chaleur urbain	10
I.1.3. Microclimat Urbain	11
I.2. Confort thermique	11
I.2.1. Paramètres qui influent sur le confort thermique	11
I.2.2. Approches d'évaluation du confort thermique.....	12
I.2.2.1. Approche physiologique.....	13
I.2.2.2. Bilan thermique	13
I.2.3. Sources particulières d'inconfort.....	13
I.3. Parametricisme ; penser la forme urbaine par la technologie	14
I.3.1. Design urbain	16
I.3.2. Design paramétrique ; une disposition intelligente	17
I.3.3. Facteurs et méthodes de modélisation du Confort thermique extérieur	19
I.3.4. Confort thermique extérieur : quelques facteurs de modélisation	19
I.3.5. Méthodes de modélisation du confort thermique extérieur	20
Conclusion.....	24

Chapitre II

Evaluation du confort thermique extérieur ; modèles physio-thermique

Introduction	26
II.1. Modèles physio-thermique du confort.....	26
II.1.1. Predicted Mean Vote (PMV)	26
II.1.2. Physiological Equivalent Temperature (PET)	27
II.1.3. New Standard Effective Temperature (SET*)	29
II.1.4. Outdoor New Standard Effective Temperature (OUT_SET*)	29
II.1.5. Universal Thermal Climate Index (UTCI)	30
II.1.5.1. Bases physiologiques	30
II.1.5.2. Modèle de Fiala	31
II.1.5.3. Universal Thermal Climate Index UTCI ; Définition	32
II.1.5.3.1. Modelage statistique du « UTCI »	34
II.1.2. Rayman	37
II.1.3. SOLWEIG	38
II.1.4. COMFA	39
II.1.5. ENVI-Met	40
II.1.6. Température moyenne radiante	41
Conclusion.....	42

Chapitre III

Le microclimat urbain à l'épreuve du design paramétrique

Introduction	43
III.1. Design paramétrique.....	44
III.1.1.1. Niveaux du design paramétrique	46
III.1.1.2. Outils conceptuels de design paramétrique	47
III.1.1.3. Outils constructifs du design paramétriques	47
III.1.1.4. Définition du paramétrique	47
III.1.1.5. Définition de l'algorithmique	48
III.1.1.6. Paramétrique par rapport à algorithmique	49
III.1.1.7. Historique du modèle paramétrique	49
III.1.2. Génération de la forme	50
III.1.1. Plug-in Grasshopper.....	52
III.1.1.1. Génération de la structure urbaine	52
III.1.1.1.1. Cellular automata	52
III.1.2. Decoding Spaces.....	54

III.2. Outils paramétriques du Microclimat.....	54
III.2.1. Ladybug:	55
III.2.2. Méthode de calcul de (UTCI) dans LADYBUG	57
III.3. Optimisation de la performance : résolution des problèmes par évolution.....	58
III.3.1. GENE_ARCH	58
III.3.2. Galapagos	58
III.3.3. Wallacei	60
Conclusion.....	61

Chapitre IV

Apports et limites du design paramétrique ; essais d'application

Introduction	62
IV.1. Démarche et outils d'investigation	62
IV.2. Premier essai de simulation.....	62
IV.2.1. Diagnostic (état des lieux).....	63
IV.2.1.1. Choix du site.....	63
IV.2.1.2. Données climatiques de Bou Saada.....	66
IV.2.1.3. Analyse bioclimatique	67
IV.2.1.4. Simulation de l'UTCI.....	68
IV.2.1.5. Proposition d'un tissu nouveau	69
IV.2.1.6. Vérification du confort thermique par l'UTCI	70
IV.3. Deuxième essai de simulation	71
IV.3.1. Méthode	72
IV.3.1.1. Génération de la forme	74
IV.3.2. Optimisation de la morphologie.....	75
IV.3.3. Fitness et rayonnement solaire.....	76
IV.4. Résultats et discussion	76
IV.4.1. Premier essai	76
IV.4.1. Deuxième essai.....	78
Conclusion.....	82

Conclusion générale

Conclusion.....	84
Apports de la recherche	85
Difficultés et limitations	86
Futures pistes de recherche	86

Bibliographie	87
Annexes.....	104
Abstract	114
المباخص	115

Liste des figures :**Chapitre I**

Fig I- 1 : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain (Bouyer J., 2009)	10
Fig I- 2 Paramètres du confort thermique extérieur (Source : Mukherjee M. & Mahanta S., 2014) dans (Lee Y.Y. et al. 2017)	12
Fig I- 3 : Algorithme générateur de forme (Source : (Harding J. et al. 2013)	14
Fig I- 4 : Maquettes d'étude générées par le même modèle paramétrique (Harding J. et al. 2013)	15
Fig I- 5 : Plan one North à Singapour ; Plan Zorrozaurre à Bilbao ; Plan Kartal-Pendik à Istanbul et Le plan de Thames Gateway à Londres. (Source : R. Canuto & L. Amorim, 2012)	16
Fig I- 6 : Exemple de projets étudiés (Source : M. A. Schnabel, 2007)	17
Fig I- 7 : Diagramme des approches d'évaluation du confort selon les objectifs (Source : (Chen L. & Ng E., 2012)	20
Fig I- 8 : Le flux des données entre les différents logiciels (Bajšanski et al, 2015)	23

Chapitre II

Fig II- 1 : Distribution de fréquence de pourcentage de la perception thermique des interviewés et le PET calculé à Matsudo Central park (Source: Thorsson et al. 2007).	27
Fig II- 1 : Distribution du pourcentage de fréquence pour la perception thermique prédit par le (PMV) et la perception thermique des interviewés (ASV) (Source : Thorsson et al. 2004)	29
Fig II- 3 : Valeurs d'isolation thermique globale pour différentes températures ambiantes et vitesse du vent (en référence à 10m au-dessus du sol) : Icl, r= isolation résultante des vêtements. Source (Błazejczyk et al. 2010)	33
Fig II- 4 : Schéma de l'évaluation climatique par UTCI calculé à partir de sortie dynamique du modèle thermo-physiologique augmenté par le modèle d'habillement	

(Source : Błazejczyk et al. 2010).....	34
Fig II- 5 : Échelle de niveaux de stress thermique basée sur l'UTCI. (E. Redon, 2017)	36
Fig II- 1 : L'environnement bâti et les paramètres environnementaux qui influencent la TMR (source : T. Rakha, 2015).....	37
Fig II- 7 : Exemple de variation spatial de la température moyenne radiant (Source : F. Lindberg et al. 2008).....	38
Fig II- 8 : Exemple de modélisation et simulation de la température de la façade extérieure, sous ENVIMET (source :H. Simon, 2016)	41
Chapitre III	
Fig III- 1 : Interface de page web pour générer des types d'habitation (Source : S. Chowdhury & M. A. Schnabel, 2018)	45
Fig III- 2 : Le workflow dans le design paramétrique	46
Fig III- 3 : Dessin d'un rectangle à l'aide du modèle paramétrique (Source : D. Davis, 2013)	50
Fig III- 4 : Génération de la structure urbaine selon un générateur de forme récursif (Source : J. N. Beirão et al., 2011).....	51
Fig III- 5 : L'interface de Rhinoceros et Grasshopper (source : auteur)	52
Fig III- 6 : Modèles de forme urbaine (Source : Koenig, 2011).....	52
Fig III- 7 : Exemple de quelques configurations géométriques possibles générées par cellular automata (Source : M. Stavric & O. Marina, 2011).....	53
Fig III- 8 : Principe de la Cellular Automata (source:M. Stavric & O. Marina, 2011)...	53
Fig III- 9 : Etapes du design urbain paramétrique (Source : O. Veselý, 2018).....	54
Fig III- 10 : : l'interface de Ladybug (source : auteur).....	55
56Fig III- 11 : Flux d'informations dans le plugin Ladybug (inputs et outputs) (source : https://www.food4rhino.com/app/ladybug-tools)	56

Fig III- 12 : Une charte qui illustre le flux et la relation entre les différents input et moteurs de simulation et le composant de calcul de l'UTCI (source : Mackey C. et al., 2017).....	57
Fig III- 13 : Les composantes de GENE_ARCH	58
Fig III- 14 : Différentes générations de recherche du sommet ((D. Rutten, 2013)	59
Fig III- 15 : exemple d'optimisation selon le rayonnement (Source : K. Konis et al., 2016), éditée	59
Fig III- 16 : Liste des Input et Output de Wallacei (Source : https://www.wallacei.com/learn)	60
Fig III- 17 : Interface de Wallacei Avec un exemple de cas d'étude (Source : https://www.wallacei.com/chinese-university-of-hongkong)	60

Chapitre IV

Fig. IV- 1 : Zones arides et semi arides dans le monde (Konya A., 1982 dans Ould-henia A., 2003).....	63
Fig. IV- 2 : Situation géographique de la ville de Bou Saada (Source :M. M. Salmon et al., 2009))	64
Fig. IV- 3 : Image Satellite illustrée (Source : Google Earth 2019)	65
Fig. IV- 4 : Vues sur le tissu existant (Source : Auteur).....	65
Fig. IV- 5 : Photos du site d'intervention avec le tissu existant à droite (Source : Auteur)	66
Fig. IV- 6 : Coupe transversale Nord – Sud du relief (Revue Geo dans Ould-henia A., 2003)	67
Fig. IV- 7 : Température de l'air, heure par heure, pendant une année	68
Fig. IV- 8 : calcul de la semaine typique de l'été et de l'hiver (Source : Auteur).....	68
Fig. IV- 9 : Simulation et distribution spatiale de l'UTCI en hiver et en été (source : auteur)	69
Fig. IV- 10 : Distribution spatiale du rayonnement solaire dans l'espace extérieur (source : auteur)	70

Fig. IV- 11 : Comparaison entre l'intensité du rayonnement solaire entre le tissu existant et le tissu ancien (source : auteur)	70
Fig. IV- 12 : Confort thermique dans la nouvelle configuration (source : Auteur).....	71
Fig. IV- 13 : Distribution spatiale de l'UTCI à l'extérieure à une hauteur de 1,5m (Source : Auteur)	71
Fig. IV- 14 : Diagramme des étapes de l'essai (Source : auteur)	72
Fig. IV- 15 : Relations entre les différents outils (Source : Auteur).....	73
Fig. IV- 16 : Vue tridimensionnelle de la configuration urbaine L'état initial de l'essai (Source : auteur).....	73
Fig. IV- 17 : Vue partielle de l'algorithme utilisé pour la génération de la forme et les gênes de la géométrie urbaine (Source : Auteur)	74
Fig. IV- 18 : Algorithme de la génération d'une grille régulière.....	75
Fig. IV- 19: Graphe de la progression de solutions générées et l'amélioration graduelle de Fitness (Source : Auteur).....	75
Fig. IV- 20: Configuration finale obtenue après le processus de l'optimisation évolutionnaire	76
Fig. IV- 21 : La voirie et le tracé rectiligne de l'ancien et nouveau tissu.....	78
Fig. IV- 22 : Méthode de génération de forme urbaine en considérant les obstacles naturels (Source: C. Schneider et al., 2010). A. les obstacles B. la configuration urbaine générée	79
Fig. IV- 23 : Evolution de la forme urbaine guide le but de minimiser la radiation solaire à une hauteur de 1,5m (Source : Auteur).....	81

Liste des Tableaux :

Tab I- 1 : Résumé des limitations des outils disponibles de simulation de la température moyenne radiante (source : Rakha, 2015)22

Tab. II. 1. les gammes du PMV et PET pour différents degrés de perception thermique et stress physiologique (Source: A. Matzarakis et al., 1999)28

Tab II- 2 : Sensation de confort et budget énergétique (A. Angelotti et al., 2007) 39

Tab III- 1 : Comparaison des outils d’analyse environnementale sous Rhino/Grasshopper (source : Roudsari, 2013).....55

Tab. IV. 1 : Les 5 meilleures solution de l’évolution (source: auteur) 80

Introduction Générale

Introduction

«*The hope is that, in not too many years, human brains and computing machines will be coupled together very tightly, and that the resulting partnership will think as no human brain has ever thought and process data in a way not approached by the information-handling machines we know today* ». Licklider, 1960.

Dans le cadre de l'initiation à la recherche en magistère, nous tentons de construire un objet de recherche à partir d'une constatation (observation). D'où émane l'idée de ce travail intitulé « *Design paramétrique : Outil d'amélioration du confort thermique extérieur en climat aride* » que nous proposons.

A priori, le constat à mettre en relief dans la présente recherche est celui du réchauffement planétaire qui se manifeste de plus en plus. Le monde entier est maintenant conscient des effets néfastes de l'industrialisation et de l'abus des technologies énergivores sur notre planète. L'effet le plus prédominant est l'augmentation continue de la température de la planète, ce qui a des incidences directes sur le confort thermique extérieur.

La tendance vers la ville compacte peut favoriser la marche comme mode de déplacement. Pour assurer un tel changement dans l'attitude des gens, il ne suffit pas seulement de tracer des itinéraires bien définis à cette fin mais il faut assurer un minimum de confort thermique, surtout pour les piétons qui doivent l'emprunter d'une façon quotidienne ou même occasionnelle. Aussi, pour changer la fonction des espaces publics d'un simple espace transitoire parcouru pour l'aller ou le retour de la maison aux lieux de travail, d'étude ou de loisirs, et la rehausser vers une fonction de rencontre ou de détente.

Néanmoins, nous sommes trop habitués au confort thermique, les températures de notre environnement intérieur sont si bien réglées que nous sommes confortablement au chaud les jours d'hiver les plus froids et agréablement au frais lors des journées les plus chaudes de l'été. Par contre, plusieurs de nos milieux extérieurs ne sont pas thermiquement confortables. Nous devons nous incliner face au vent froid de l'hiver tout en traversant la neige pour un parcours aussi court qu'il soit. Nous avons à supporter la canicule quand nous essayons de trouver un endroit pour manger à l'extérieur dans les beaux jours ensoleillés de l'été. C'est

Problématique, le milieu urbain doit être conçu pour avoir un confort thermique dans presque toutes les conditions météorologiques et à presque n'importe quel moment de la journée durant toute l'année (R. D. Brown, 2010).

La géométrie urbaine et la forme du profil, la hauteur et la taille des bâtiments, l'orientation des rues et des bâtiments, et la nature des surfaces des zones urbaines ouvertes, tous ces facteurs ont un impact sur le climat urbain. Ainsi, chaque élément du milieu urbain (bâtiments, routes, aires de stationnement, usines, etc.) crée autour et au-dessus de lui un climat modifié avec lequel il interagit. Notons qu'il existe des interactions complexes entre les bâtiments et leur environnement extérieur. Et chaque groupe de bâtiments, modifie les conditions climatiques qui l'entourent.

D'autre part, il est à souligner que certains détails de conception urbaine ont une grande influence sur les conditions climatiques qui affectent les piétons à l'extérieur, notamment en ce qui concerne la protection contre la pluie, le soleil et l'éblouissement dans les rues (B. Givoni, 1998, pp. xii–xiii). Rakha en 2015, affirme que le confort thermique extérieur est vital pour les espaces publics. Assurer une promenade au long d'une allée confortable et permettre le déroulement de certaines activités dans un parc public demandent un microclimat adéquat, ce qui relève du travail des concepteurs qui ont un rôle important à jouer dans la création de ces espaces.

Les paramètres qui sont impliqués dans le design urbain sont accablants d'où est né le besoin de profiter de l'avancement continu dans le domaine du design paramétrique. Il semble être en implication croissante dans le processus de la conception architecturale et urbaine.

Dès lors, le **design paramétrique** urbain est une approche globale, utilisé par les architectes comme une approche pour résoudre les problèmes complexes. Cette approche est globalement reconnue grâce aux avantages qu'elle offre durant toutes les phases de la conception et de la réalisation des projets. Elle est exclusivement utilisée pour la rapidité dans l'exécution des calculs et des simulations.

Problématique

Nous insistons sur le fait qu'aujourd'hui « l'urbanisme, par nature, fonctionne avec des données urbaines massives dynamiques. Pour cela, différents systèmes de codes urbains ont été mis en place pour l'enregistrement des données. Cependant, par rapport à l'énorme quantité de données accumulées, la capacité de les traiter et de les croiser est plutôt limitée.

Ce problème commence à devenir plus crucial, auquel faut-il faire face, mais comment lui faire face ? La culture de la planification urbaine de l'approche «top-down» à l'approche «bottom-up» dont la traduction littérale est «descendante» et «ascendante». Cette dernière considère le tissu urbain comme un système complexe autoorganisant qui présente une grande complexité et une énorme quantité d'interactions internes. Sous cette lumière, une nouvelle question urbaine est légitimée : est-il possible de construire une plate-forme commune pour croiser les différents types de données urbaines en utilisant des techniques de calcul et des techniques paramétriques ? » (H. Feng & Y. Zhang, 2009) dans (M. M. Saleh & K. S. Al-Hagla, 2012).

Beaucoup de recherches ont traité le confort thermique extérieur, son importance, sa modélisation et les facteurs qui ont un impact sur son amélioration. Mais l'application de ce savoir est peu impliquée dans la conception de nos villes, cela est dû à plusieurs raisons : le bien être des utilisateurs est considéré plus à l'intérieur qu'à l'extérieur par manque de maîtrise des facteurs du microclimat chez les architectes en général, également par manque d'une démarche qui intègre le savoir-faire du microclimat dans les premières étapes de la conception surtout en milieu urbain.

Le problème peut être traité à la source dans les premières étapes de la conception notamment à l'échelle urbaine, surtout que les méthodes de simulation qui existent, à ce jour, prennent beaucoup de temps pour donner des résultats et ne sont pas optimisées pour travailler dans une atmosphère de conception qui nécessite une évaluation rapide.

« La majorité des études environnementales quantitatives précédentes en architecture et en urbanisme ont principalement mis l'accent sur des bâtiments isolés (niveau microscopique) ; il est plutôt conseillé de regarder l'environnement bâti dans son ensemble (niveau macroscopique), en particulier à l'échelle intermédiaire qui correspond au quartier

ou à la morphologie d'une portion de la ville, quand il s'agit de la gestion et de l'évaluation efficace de l'environnement » (T. Hsie, 2008) in (M. M. Saleh & K. S. Al-Hagla, 2012)

Cependant, « il est tellement difficile de décrire et de simuler les interactions entre la morphologie urbaine et les conditions climatiques, au niveau microscopique, notamment en raison de la complexité de la géométrie de ce cadre, qu'il semble intéressant de travailler à un niveau macroscopique, ce qui permet de s'éloigner de l'hétérogénéité locale, et de considérer des volumes suffisamment larges et des effets d'interaction globale entre la forme urbaine et le microclimat ». (Adolphe, 2001) in (M. M. Saleh & K. S. Al-Hagla, 2012).

Après l'observation, l'élaboration de la problématique par la question globale mais précise et pertinente s'impose. Cette dernière serait l'angle d'attaque du sujet. De par notre intérêt pour l'amélioration du confort thermique extérieur, nous posons incontestablement la question suivante :

Comment utiliser les logiciels de simulation pour générer la morphologie urbaine en réponse au climat et au microclimat pour améliorer le confort thermique extérieur ?

Cette question, une fois, examinée de plus près, elle nous donne une multitude de questions plus spécifiques qui viennent à l'esprit :

- Quels sont les paramètres du climat les plus représentatifs du potentiel et qui risquent d'affecter le confort des piétons ?

- Comment créer un modèle urbain informatisé apte à comprendre les enjeux du climat et la géométrie du soleil et l'adapter en un élément générateur de la forme urbaine ?

- Comment intégrer ces paramètres dans un processus mathématique et informatique aussi quantifiable que qualifiable pour pouvoir les utiliser, après, dans la génération de la morphologie urbaine ?

Objectif de la recherche

Dans cette recherche explicative, qualitative et quantitative à la fois, et qui est à caractère plutôt théorique mais technique pratique, nous allons essayer de lier le design urbain paramétrique avec le confort thermique extérieur, un paramètre environnemental qui n'est

pas souvent traité dans cette approche urbanistique et complètement négligé dans d'autres approches.

Cette recherche a pour but d'élaborer un algorithme qui génère une morphologie urbaine optimisée par rapport au confort thermique extérieur.

Ainsi, la concrétisation de ce lien sera réalisée à la base des résultats et conclusion obtenus dans la partie théorique de ce travail.

Hypothèse

Regrouper tous les outils, de la conception paramétrique et de simulation, sous une seule plateforme, permet d'utiliser l'informatique et la conception par computation pour explorer les éventuelles morphologies urbaines. Ce qui offre un meilleur compromis entre le confort thermique extérieur en hiver et en été.

Méthodologie de la recherche

Le raisonnement de cette recherche se base sur les étapes suivantes :

1. Clarifier les concepts utilisés dans le titre et spécifier l'échelle d'intervention et d'exploration.
2. Dresser un état de l'art concernant les facteurs qui affectent le confort thermique extérieur et le design urbain paramétrique et génératif.

Si on parle de design paramétrique on parle automatiquement de l'ordinateur. Cette invention qui a changé la course de l'humanité. L'interaction entre architecture et ordinateur a commencé il y a longtemps.

3. Proposer un schéma de principe et des techniques pour relier tous les facteurs ensembles et faciliter les calculs dans un processus mathématique et informatique.

4. Développer un modèle urbain informatisé capable de simuler les enjeux du climat et

la course solaire et les adapter en un élément générateur de la forme urbaine (à titre d'essai et pour l'illustration).

5. Appliquer sur un cas d'étude (Bou Saadâ) qui sera validé à la fin par une simulation à l'aide du de l'indice Universal Thermal Comfort Index (UTCI)

Outils d'investigation

Comme la conception de haute performance est de plus en plus souhaitable dans le domaine de l'architecture, la nécessité de soutenir les architectes avec des outils d'analyse de l'environnement est également en croissance.

Rhino / Grasshopper est l'une des plateformes de conception paramétrique les plus largement utilisées par les concepteurs d'aujourd'hui. A ce titre, il existe déjà un certain nombre de plugins environnementales développées pour Rhino / Grasshopper.

Structure du mémoire :

Pour répondre à la problématique posée et aux objectifs fixés, cette étude comporte une introduction, quatre chapitres et une conclusion. Les chapitres se présentent comme suit :

Chapitre I : MICROCLIMAT URBAIN ET CONFORT THERMIQUE EXTERIEUR : APPORT DU DESIGN PARAMETRIQUE, il traite de différents concepts relatifs à l'étude ; microclimat urbain, confort thermique extérieur et design paramétrique. Il englobe les théories sur les concepts par des définitions scientifiques, en mettant en exergue les facteurs influant sur le confort thermique ainsi qu'un inventaire de ses modèles physio-thermiques afin d'extraire les paramètres liés au confort thermique extérieur.

Chapitre II : EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE EXTERIEUR par les MODELES PHYSIO-THERMIQUE, celui-ci tente de dresser un Etat de l'art, qui relate différentes approches du confort thermique extérieur, mettant en application des modèles physio-thermiques pour le quantifier.

Chapitre III : LE MICROCLIMAT URBAIN A L'EPREUVE DU DESIGN PARAMETRIQUE, celui-ci explique et analyse la relation du Design Paramétrique au microclimat urbain, en tentant d'élaborer une multitude de définitions du Parametricism et

du Design urbain paramétrique, ainsi que les méthodes du design urbain et les Outils du design paramétrique.

Chapitre IV : APPORTS ET LIMITES DU DESIGN PARAMETRIQUE : ESSAI D'APPLICATION, ce dernier est dédié au travail de la simulation : Application, situation et climat, conception, simulation et enfin l'optimisation.

Enfin ce mémoire est parachevé par une conclusion générale, qui précise l'originalité du sujet, en donnant un ensemble de recommandations et en ouvrant des perspectives pour d'éventuelles recherches dans ce domaine.

Chapitre I

Microclimat urbain et confort thermique extérieur ;

Apport du design paramétrique

Introduction

Du au réchauffement climatique, le **microclimat urbain s'altère** davantage. A ce titre, considéré comme l'une des causes qui influent sur l'environnement urbain, le réchauffement climatique tend à amplifier l'inconfort thermique. Autrement, l'usage des espaces publics extérieurs et le comportement des individus relèvent du confort thermique ressenti qui dépend à son tour des conditions climatiques. Cela dit, dans l'estimation des situations de confort, les relations entre l'individu et son environnement extérieur sont déterminantes.

Certes, les exigences du **confort thermique extérieur** sont multiples et urgentes mais l'objectif d'obtenir un meilleur confort thermique extérieur dans les meilleurs délais nécessiterait des moyens intelligibles, d'autant plus qu'il y a plusieurs facteurs qui peuvent agir sur ce **confort extérieur**.

L'objectif de ce chapitre est la mise en exergue des trois concepts clés de notre recherche '*microclimat urbain*' '*confort thermique extérieur*' et '*design paramétrique*' en dressant un état de l'art. Mais aussi, la mise au point de techniques de simulation numérique par le biais de logiciels paramétriques « ladybug et grasshopper » qui permettraient une quantification précise des impacts microclimatiques liés aux aspects de certaines **configurations urbaines**. Le questionnement qui l'animerait est le suivant : - *quels sont les critères à considérer pour l'évaluation du confort thermique extérieur ?*

- En cas où une configuration urbaine arriverait à garantir -plus ou moins- le confort, comment pourrait-on l'évaluer ?

En interpellant les niveaux de confort de chaque utilisateur dans l'espace pendant toute l'année, on peut construire un environnement. Bien que vis-à-vis de l'authenticité des résultats cela semble fiable, mais c'est pratiquement impossible de le faire pour des raisons de temps et de coût. Surtout, pour des projets qui ne sont pas encore construits. S'ils existent plusieurs scénarios, on ne peut jamais les tester tous. La solution de faisabilité s'avère dans la simulation ; on modélise des scénarios par ordinateur afin d'évaluer le confort par simulation. Néanmoins, cette solution suscite une autre question qui s'impose comme suit : comment simuler la sensation de confort chez l'être humain ?

I.1. Microclimat urbain altéré : exigences urgentes

Le confort thermique extérieur est différent du confort thermique intérieur. L'Homme dans le milieu extérieur est soumis à des conditions plus difficiles et imprédictibles. Les échanges de chaleur sont plus compliqués à calculer et bien plus difficiles à contrôler. Dans les climats chauds et secs la saison d'été est la période la plus indésirable.

Pour comprendre le confort thermique extérieur on a besoin de comprendre le changement climatique, le microclimat et la réaction du corps humain envers les éléments qui l'entourent.

Le climat n'est plus le même. Il change d'année en année. Le changement est réel et le danger est pressant. Notre manière de vivre dépend de notre environnement. Il est important de comprendre ce phénomène de plus près pour pouvoir modérer son effet.

I.1.1. Réchauffement climatique : un constat alarmiste

Le changement climatique est l'un des défis les plus complexes de notre siècle. Aucun pays n'est à l'abri de ses effets indésirables et aucun pays ne peut, seul, faire face aux décisions politiques controversées, aux profondes transformations technologiques et autres enjeux indissociables et lourds de conséquences à l'échelle de la planète.

Le réchauffement de la planète induit la modification du paysage rural, la déforestation, l'assèchement des lacs, la pollution de l'air, l'évaporation réduite, l'augmentation de température. Selon les prévisions, le climat pourrait se réchauffer de 1,4 à 5,8°C d'ici la fin du siècle. Au fur et à mesure que la planète se réchauffe, le régime des précipitations se modifie et des phénomènes extrêmes tels que sécheresses, inondations et incendies de forêts deviennent plus fréquents. Dans des zones côtières densément peuplées et dans des États insulaires, des millions de personnes seront chassées de leurs habitations par la montée des eaux. Les populations pauvres d'Afrique, d'Asie et d'autres parties du monde seront confrontées à la perspective de récoltes désastreuses, d'une baisse de la productivité agricole, et d'une recrudescence de la faim, en plus de la malnutrition et de la maladie. Les risques sont énormes, pour la planète et les générations futures, nous obligeant à agir en urgence.

I.1.2. Îlot de chaleur urbain

Depuis quelques années, l'interaction entre le climat et la ville est l'une des préoccupations principales en milieu urbain, il en résulte certains phénomènes dont l'îlot de chaleur urbain ICU (**Fig I- 1**) qui symbolise la différence de température entre les milieux urbains et les zones rurales environnantes et qui est induit par la morphologie urbaine. De nombreux chercheurs ont démontré que les températures des zones urbaines, sont généralement plus élevées de 1 à 4 °C que celles des zones limitrophes. (Akbari H. & Taha H., 1992). Ce phénomène peut être un avantage en hiver car il permet de diminuer les factures de chauffage. Cependant, dans les climats chauds, une augmentation de la température entraîne une augmentation de la demande énergétique en conditionnement de l'air (Vinet J., 2000).

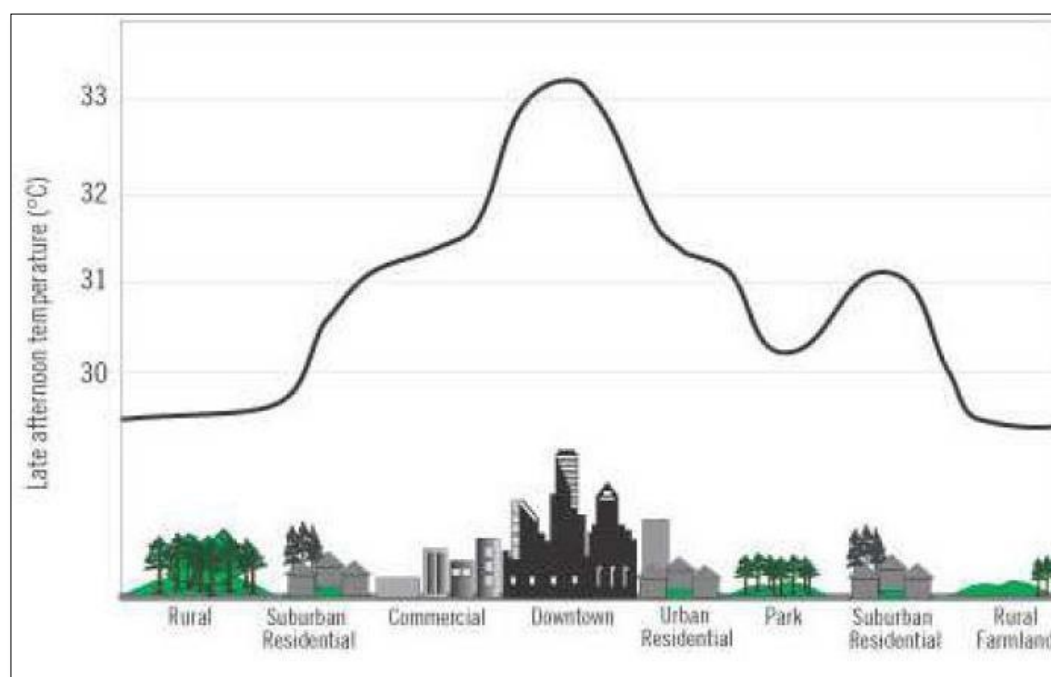


Fig I- 1 : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain (Bouyer J., 2009)

En effet, des observations météorologiques ont démontré que les températures des centres urbains sont en moyenne supérieures à la normale de 4°C et peuvent atteindre 12°C de plus que dans les régions limitrophes. L'ICU est engendré par la morphologie de la ville, les matériaux utilisés, les conditions naturelles, climatiques et météorologiques ainsi que les différentes activités. Il influence le climat de la ville et le bâtiment énergivore est

en grande partie responsable de ce phénomène. Pour solutionner partiellement cette problématique, réviser la qualité environnementale, réhabiliter énergétiquement, et recourir aux énergies renouvelables et leurs applications participeront à l'amélioration et à la réduction de son impact (Rapport PHC Maghreb, 2019).

I.1.3. Microclimat Urbain

Le microclimat peut se limiter à une région géographique assez restreinte, représentant ainsi ses conditions climatiques, qui sont nécessairement distinctes de celles de la région où se situe cette zone.

Dans sa publication de 1998, Givoni reconnaît l'effet de la **morphologie urbaine** sur le **microclimat** et, par conséquent, sur la consommation énergétique. Les paramètres physiques qu'il a pu relever sont : la taille de la ville, la densité de la surface bâtie, l'occupation des sols, la hauteur des bâtiments, l'orientation et la largeur des rues, et les détails spécifiques au bâtiment qui affectent directement les conditions extérieures. Givoni (1998) propose notamment des recommandations pour le design urbain de différents climats. (Raydan & Steemers 2006).

I.2. Confort thermique

Le confort thermique est défini comme l'état d'esprit qui exprime la satisfaction de l'être humain envers son environnement thermique (ASHRAE Standard 55, 2013). Cette définition suggère la signification de « *l'état d'esprit* » ou de « *satisfaction* » ouverte. Mais, elle met en valeur le jugement concernant le confort, qui est un processus cognitif impliquant plusieurs données influencées par des processus ; entre autres ; physiques, physiologiques et psychologiques. Cela explique le recours aux différentes et multiples approches afin d'évaluer le confort extérieur.

I.2.1. Paramètres influant sur le confort thermique

Le confort thermique résulte de plusieurs paramètres interdépendants d'ordre subjectif et objectif (**Fig. I- 2**). Selon E. Gratia & A. De Herde (2006), deux de ces paramètres sont étroitement liés à l'homme dont le métabolisme et l'habillement, les cinq autres sont, d'une manière ou d'une autre, liés à son environnement.

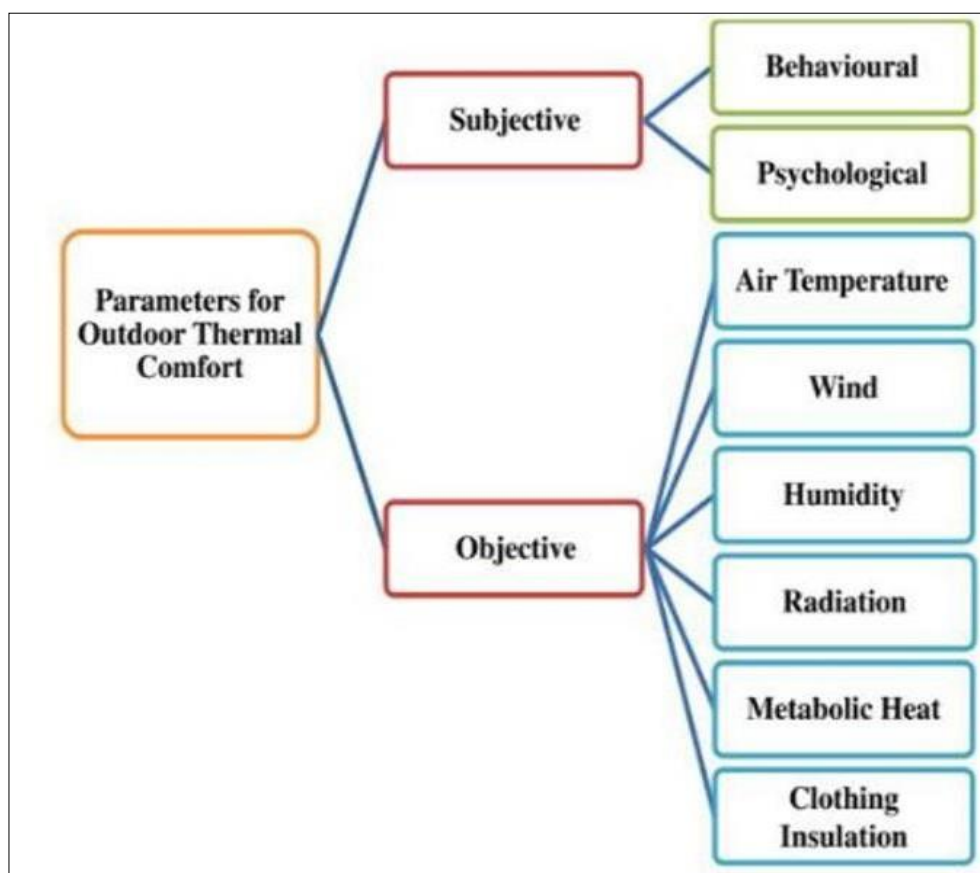


Fig. I- 2 : Paramètres du confort thermique extérieur (Source: Mukherjee M. & Mahanta S., 2014) dans (Lee Y.Y. et al., 2017)

Ces mêmes auteurs (E. Gratia & A. De Herde, 2006) évoquent d’autres paramètres influant sur le confort thermique, notamment la température de l’air, la température des surfaces, l’humidité relative, le mouvement de l’air ainsi que le rayonnement solaire direct.

I.2.2. Approches d’évaluation du confort thermique

En 2011, Nikolopoulou a présenté les approches d’évaluation du confort thermique en deux catégories : la première approche est physiologique, la seconde est en rapport avec les études de terrains. En plus, elle a rappelé l’importance de l’adaptation aux niveaux ; physiologique physique et psychologique pour améliorer la sensation de confort. Elle conclue que la part du microclimat dans la perception du confort n’est que de 50%. Notre perception aux températures extérieures, est influencée par notre niveau d’acclimatation du comportement d’adaptation lié à l’habillement. La variation spatiale des températures et la consommation des boissons fraîches, sont autant considérables. Sans négliger « l’adaptation » qui a un impact aussi important sur la sensation du confort.

I.2.2.1. Approche physiologique

Pour le bon fonctionnement du corps humain, la température de son noyau profond doit être gardée constante à environ 37 °C en maintenant l'équilibre entre les gains/pertes de chaleur et le métabolisme. Cette équation d'équilibre thermique basique décrivant l'échange thermique entre le corps humain et l'environnement a servi de référence de base pour les normes thermiques actuelles, et ce, selon les réactions physiologiques du corps humain (American Society of Heating R. and A.-C.E., 1989).

I.2.2.2. Bilan thermique

Selon Gratia E. & De Herde A., 2006, le corps humain tend à conserver une température constante à cause de la nature homéo-thermique. C'est ainsi qu'il est impératif d'éliminer la chaleur produite dans le corps. Cette élimination se fait au travers de la peau et par la respiration. La chaleur dégagée par le métabolisme, et qui est plus ou moins élevée selon l'activité, est éliminée selon divers mécanismes. Plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant ; c'est-à-dire, la convection et l'évaporation par la respiration ou par la surface de la peau).

Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan, alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (< 1 %). Le corps perd également 6 % de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

Le bilan énergétique représente la différence entre l'apport énergétique et la dépense énergétique. Lorsque l'apport énergétique dépasse la dépense énergétique, le bilan énergétique est positif. Lorsque l'apport énergétique est inférieur à la dépense énergétique, il se produit un bilan énergétique négatif.

I.2.3. Sources particulières d'inconfort

Plusieurs sources d'inconfort ont été évoquées par E. Gratia & A. De Herde (2006). Ils les interprètent, entre autres, par l'asymétrie dans la température de rayonnement, les courants d'air, la température du sol trop basse ou trop élevée, en plus de la stratification verticale des températures.

I.3. Paramétricisme ; penser la forme urbaine par la technologie

« La pensée paramétrique est une manière de relier les systèmes tangibles et intangibles dans une conception sans forcément considérer un outil numérique ou un autre. Elle propose à l'architecte, ou le concepteur en général, de commencer avec les paramètres de la conception et non par des solutions préconçues ou prédéterminées. » (Karle D. & Kelly B.M., 2011).

Alors, la pensée paramétrique est aussi utile que nécessaire puisqu'elle procure un changement dans le paradigme des pratiques académiques et professionnelles. En formulant les projets dès le début comme le produit des paramètres, les architectes seraient moins concernés par la production de la bonne solution et plus concernés par poser les bonnes questions. Ceci les amènerait à établir une série de règles et relations avec des variables associatives. D'après Karle et Kelly, c'est ce qui déclenche un processus de design paramétrique (Karle D. & Kelly B.M., 2011)

En 2013 Harding et al., proposent un modèle pour définir la forme architecturale d'une manière topologique qui peut changer de forme mais garder les relations intrinsèques définies par l'architecte. Développer, ensuite, les différentes solutions paramétriquement (Fig. I- 3).

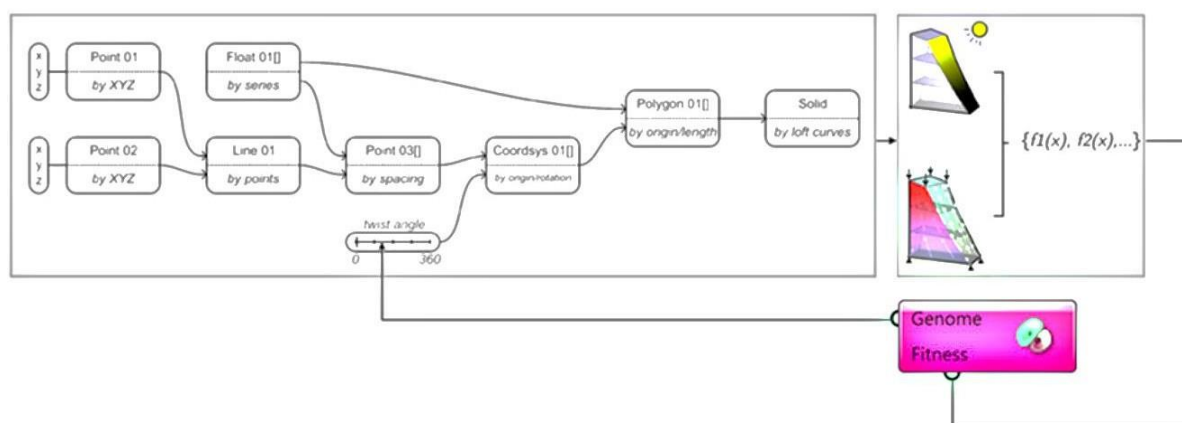


Fig. I- 3 : Algorithme générateur de forme (Source : Harding J. et al., 2012)

Après un tas d'essais on a, enfin, la possibilité d'imprimer les meilleures solutions pour la visualisation des maquettes d'étude (**Fig I- 4**).



Fig I- 4: Maquettes d'étude générées par le même modèle paramétrique (Harding J. et al., 2012)

D'où l'apparition du « *Paramétrisme* » qui est une nouvelle notion émanant de la notoriété de ces nouvelles techniques.

Patrik Schumacher, associé de « Zaha Hadid Architects » et directeur fondateur du « Design Research Laboratory at the Architectural Association » à Londres, a exprimé que le terme devrait être adopté pour un nouveau style d'architecture. Dans son affirmation audacieuse, il souligne la prévalence du design paramétrique. Aujourd'hui, une prévalence qui est soutenue par la popularité des techniques de modélisation paramétrique récemment développées.

Schumacher (2009) commence son article intitulé « Parametricism : A New Global Style for Architecture and Urban Design », en présentant le Paramétrisme comme étant le nouveau style global pour l'architecture : « Il y a une convergence globale dans l'architecture d'avant-garde récente qui justifie sa désignation comme un nouveau style: le

Paramétricisme. C'est un style ancré dans les techniques d'animation numérique, ses derniers raffinements basés sur des systèmes de conception paramétriques avancés et des méthodes de programmation ». Pour Schumacher, il s'agit d'un style qui a succédé au Modernisme comme nouveau style global : « Développé depuis 15 ans et revendiquant l'hégémonie dans la pratique de l'architecture d'avant-garde, il succède au Modernisme comme prochaine vague d'innovation systématique. L'application de ses techniques est tellement répandue que le paramétricisme est maintenant mis en évidence à toutes les échelles, de l'architecture au design d'intérieur en passant par le design urbain. En effet, plus le projet est grand, plus la capacité du paramétricisme à articuler la complexité du programme spécial serait prononcée » .

En nous référant à P. Schumacher, le Paramétricisme (**Fig. I- 5**) est un nouveau style d'architecture qui succède au modernisme (Schumacher P., 2009).



Fig. I- 5: Plan one North à Singapour ; Plan Zorrozaurre à Bilbao ; Plan Kartal-Pendik à Istanbul et Le plan de Thames Gateway à Londres. (Source : R. Canuto & L. Amorim, 2012)

Des études plus poussées sur le Paramétricisme nous amènent vers d'autres concepts adjacents, entre autres, le *design urbain paramétrique*. Afin de le définir, nous allons le décomposer en deux sous-concepts distincts : **design urbain** et **design paramétrique**.

I.3.1. Design urbain

Le **design urbain**, selon (Behnam S.J. et al., 2017), est un processus qui inclut l'énoncé du problème, l'analyse des données et l'évaluation des conceptions, et qui ne sont pas établis nécessairement dans cet ordre chronologique.

En raison de l'ampleur et de la complexité de la nature des problèmes urbains, de

nombreux facteurs doivent être pris en compte dans le processus de conception afin de répondre aux phénomènes urbains. La conception paramétrique en tant que sous-ensemble d'une tendance plus large, est la conception générative.

I.3.2. Design paramétrique ; une disposition intelligente

Le design paramétrique est défini comme étant une série de questions qui établissent les variables d'un design et une définition numérique qu'on peut utiliser pour faciliter la variation de la configuration ou l'exploration des différentes variantes d'une façon dynamique.

Schnabel a présenté en 2007, grâce à l'union de la conception architecturale avec le design paramétrique une multitude de projets étudiés (**Fig. I- 6**) dans le cadre d'exploration de nouveaux outils de conception.

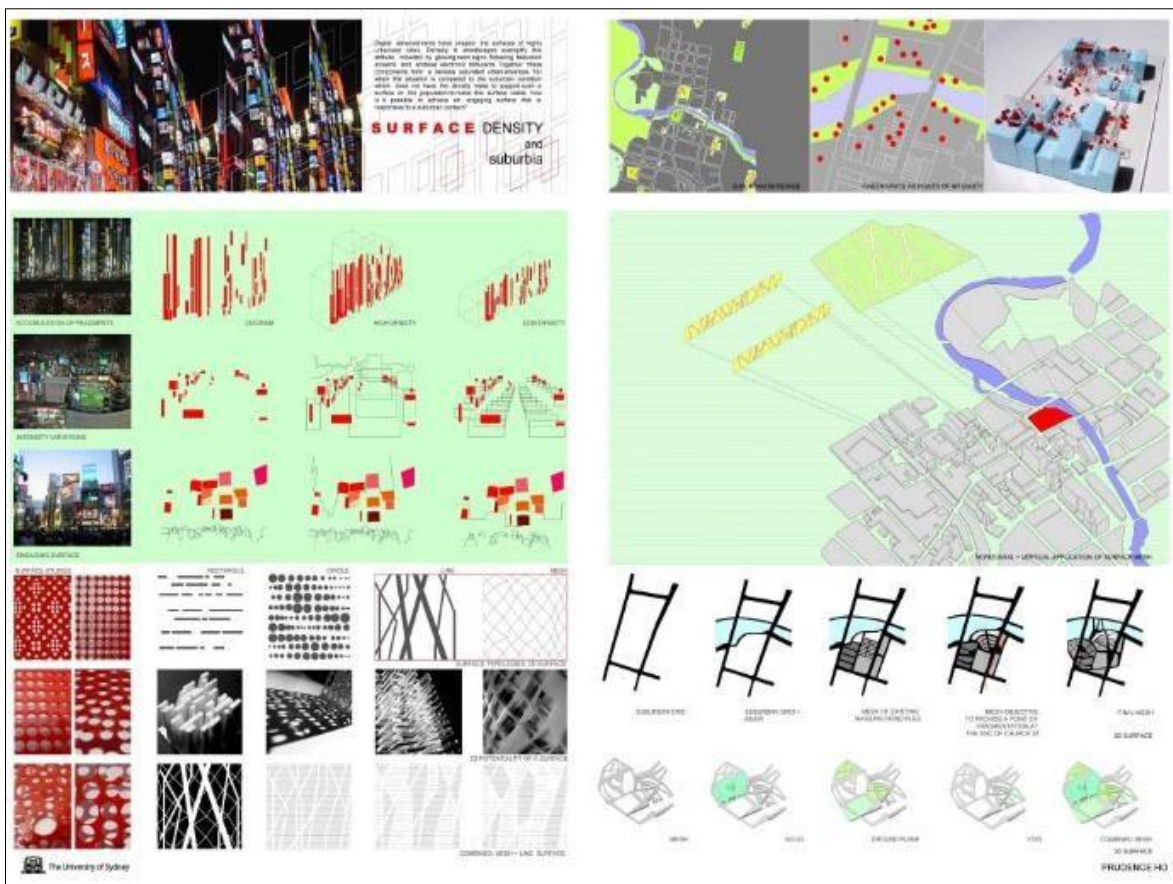


Fig. I- 6 : Exemples de projets étudiés (Source : M. A. Schnabel, 2007)

Ce qui prouve que le design paramétrique offre déjà des avantages pour les ingénieurs et les fabricants, maintenant les architectes les ont rejoints pour appliquer ces méthodes dans la création de leurs conceptions dans le but de proposer des solutions dans les premières phases du processus de la création.

D'après Kolarevic B., la conception architecturale a été inspirée par la multitude de possibilités de la technologie numérique elle-même. D'autre part, plusieurs sujets relevant de plusieurs domaines ont une influence sur la conception : les algorithmes mathématiques et géométriques, précédemment « invisibles », les formes et les structures sont maintenant visibles et spatialement compréhensibles aux architectes, par conséquent, utilisables.

En adoptant les nouvelles techniques la conception architecturale a établi des approches de conception par l'ordinateur tels que : l'espace topologique (architecture topologique), les surfaces isomorphiques (architecture isomorphique), le mouvement cinétique et dynamique (architecture animée), l'animation de forme clé (architecture métamorphique), le design paramétrique (architecture paramétrique), algorithmes génétiques (architecture évolutionnaire) et la géométrie fractale (architecture fractale).

Bien que Oxman R., a proposé en 2006 cinq classes paradigmatiques des modèles de la conception par l'ordinateur, tout de même, elle affirme que l'approche de modélisation assure un moyen pour la structure compréhensible et la représentation des possibilités génériques des modèles de la conception numérique par rapport aux relations entre concepteur, son contexte conceptuel, le processus de conception et l'objet conçu.

Ainsi, les cinq modèles proposés sont présentés comme suit : les modèles CAO, les modèles de formation, les modèles génératifs, les modèles de performance, et les modèles composés intégrés.

Toutes ces approches paramétriques nécessitent des analyses de performance dans plusieurs domaines, à savoir ; l'éclairage, l'énergie, l'acoustique, le flux des fluides, les matériaux et la durabilité, ainsi que la déconstruction des faces pour la fabrication. Mais, particulièrement, ils demandent des logiciels spécialisés, puisqu'il y a plusieurs agents et entités impliqués dans le processus du design, ce qui fait du design paramétrique un processus multidisciplinaire (Krishnamurti R., 2011) .

Quant au **design paramétrique**, ce sont tous les paramètres extérieurs qui sont pris en considération à savoir ; la circulation, l'accessibilité, l'occupation du sol, les espaces verts

... etc. Dans ce travail nous allons essayer de nous concentrer sur l'aspect du confort thermique dans l'espace urbain, qui requiert l'acquisition de plusieurs approches pour évaluer le confort à partir de la morphologie urbaine proposée et la possibilité de l'adapter en fonction des résultats obtenus.

Comme tout processus de design, il n'est pas possible d'atteindre le maximum de satisfaction dans tous les aspects du projet en question, alors il faut toujours trouver un compromis. Dans cette étape l'aspect de calculs de l'ordinateur et son aptitude d'évaluer plusieurs scénarios peut aider le designer énormément. Le défi faisant face au designer est d'interpréter les différents aspects de son projet de telle façon que l'ordinateur puisse la comprendre, ce qui nécessite une interprétation numérique quantitative de ces aspects. Subséquemment, il est nécessaire de générer la forme urbaine d'une manière interactive et intrinsèque avec les aspects du design.

I.3.3. Facteurs et méthodes de modélisation du Confort thermique extérieur

Le confort thermique extérieur est en rapport avec le corps humain lui-même et sa façon d'interagir avec son environnement. Les chercheurs ont essayé de faire une approximation de ces phénomènes.

Il y a aussi que dans la phase de conception, on a besoin de feedback immédiat et en chiffres clairs pour étayer les décisions à prendre concernant la forme urbaine. Récemment les chercheurs ont trouvé un indice qui peut faire juste cela. Un seul chiffre qui décrit le niveau de confort dans l'espace en degrés Celsius et qui est conforme à toute personne dans cet espace. Il s'agit de « Universal Thermal Comfort Index » UTCI.

I.3.4. Confort thermique extérieur : quelques facteurs de modélisation

Plusieurs facteurs sont à prendre en considération (Fig. I- 7). Ces facteurs sont en relation intrinsèque avec chaque personne en prenant en considération ; l'âge, le genre, les vêtements... etc. Néanmoins, ces facteurs considérés simultanément en simulation on pourrait aboutir à des résultats contradictoires ou très difficiles à analyser, de ce fait, les conclusions seraient improbables.

I.3.1. Méthodes de modélisation du confort thermique extérieur

La simulation du confort thermique dans le milieu urbain présente une multitude de challenges au chercheur puisqu'il y a **plusieurs facteurs** à prendre en considération. Nous nous référons aux recherches qui ont essayé de prendre en compte le facteur prédominant dans tous les calculs. Il s'agit de la « Mean Radiant Temperature (MRT)» un seul chiffre qui nous donne une représentation quantitative du milieu physique. En quelque sorte, il s'agit d'une température moyenne de toutes les surfaces et substances qui vont avoir un échange de chaleur avec le corps humain dans un espace.

En 2014, J. Huang et al, ont présenté le modèle CityComfort+ qui simule la variation spatiale de la Température moyenne radiante (Tmrt) extérieure, dans les zones urbaines denses. Ils ont opté pour cette méthode à l'aide des mesures effectuées à Boston dans les conditions météorologiques : d'hiver, de printemps et d'été.

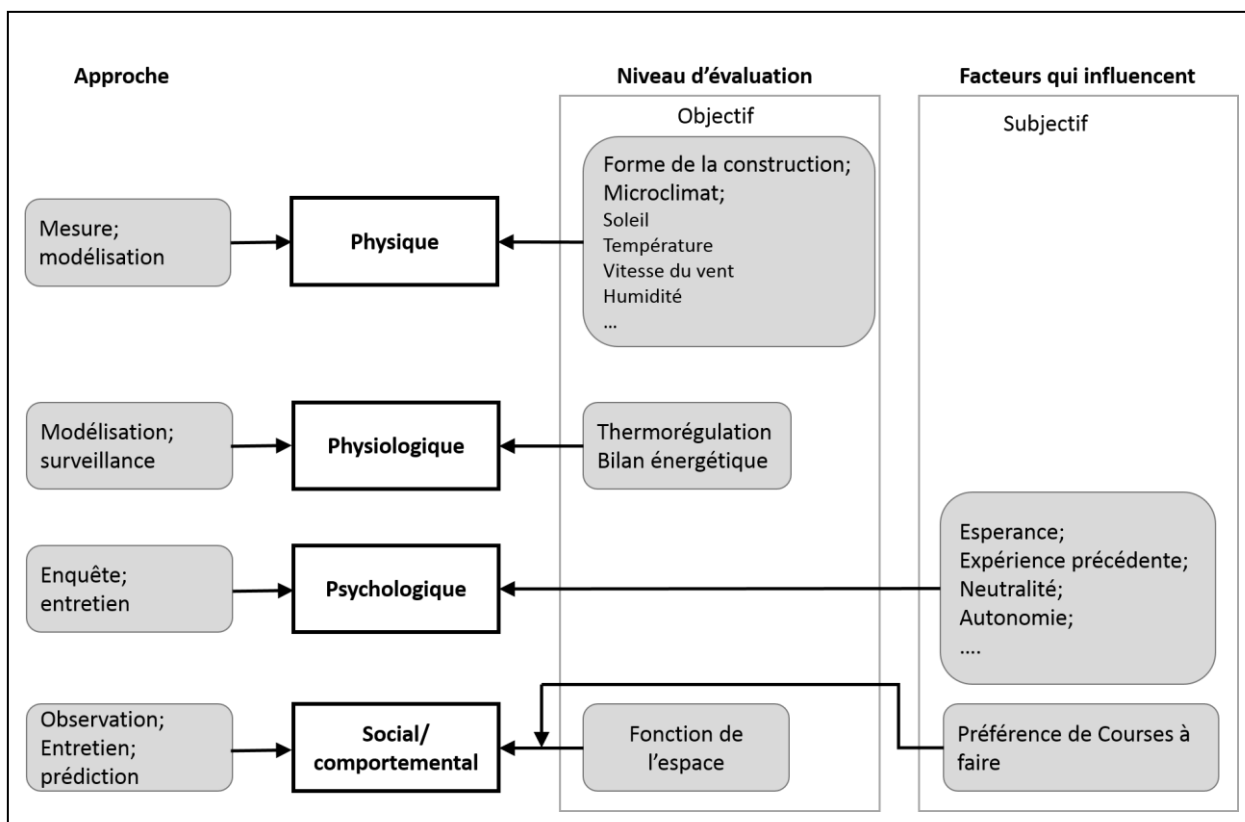


Fig. I- 7 : Diagramme des approches d'évaluation du confort selon les objectifs (Source : Chen L. & Ng E., 2012)

D'après Huang et al, la simulation de CityComfort+ a eu une bonne concordance avec la Tmrt mesurée dans les conditions du site d'étude, avec une corrélation (r de 0,97) et une

racine de la moyenne des erreurs aux carrées (Root Mean Square Error «RMSE») de 4,76°C, sur une période de 33 h d'évaluation. Il a été conclu que CityComfort+ est applicable dans l'évaluation du confort thermique des paysages urbains et d'autres lieux publics.

Désormais, c'est une démarche qui est en cours de développement. Huang et al, affirment aussi que les méthodes de modélisation de la température de surface peuvent être améliorées dans le futur, et une interface visuelle de l'utilisateur est en cours d'élaboration. Des algorithmes supplémentaires tenant compte de l'ombrage et de l'évapotranspiration de la végétation seraient éventuellement inclus.

L'étape suivante entreprise consiste à comparer ses performances avec les méthodes existantes, dont Rayman, ENVI-met et SOLWEIG. L'objectif à atteindre dans le futur, est de permettre à CityComfort+ de simuler le confort thermique en milieu urbain. À cette fin, des composants supplémentaires sont nécessaires pour estimer la vitesse du vent au milieu de l'espace (point par point), ainsi que la température de l'air, l'humidité, le transfert de chaleur du corps humain et la régulation thermique.

- **Transfert de chaleur et calcul du traçage des rayons pour le confort thermique extérieur**

Nous nous référons à ce travail de recherche que nous présentons succinctement, vu son utilité, car il va nous éclairer sur la notion de l'« UTCI».

En 2015, T. Rakha a présenté un processus de simulation de la température moyenne radiante et par conséquent les paramètres de **confort thermique extérieur**. Il avait comme objectif d'établir un outil de support de décision intégré dans la phase de conception. Cet outil est destiné à aider les architectes et les planificateurs dans la création des espaces extérieurs confortables.

Ce processus combine les équations de transfert de chaleur avec le calcul du traçage des rayons « raytracing » pour générer les températures des surfaces urbaines et tracer les valeurs de la TMR dans une grille d'analyse dans les espaces extérieurs. Il a mené une expérience de validation dans deux endroits sur le Campus de MIT (Massachusetts Institute of Technology) démontrant ainsi les potentiels et les limitations dans le processus de simulation (**Tab. I- 1**). En plus, il a donné des applications dans le cadre du traçage spatio-temporelle de la Mean Radiant Temperature MRT et Universal Thermal Comfort

Index UTCI. Il a aussi affirmé qu’il est indispensable que le processus de simulation soit validé dans différentes configurations du canyon urbain à travers plusieurs sites et sur de longues périodes (Rakha T., 2015, pp. 48–49)(Rakha T., 2015).

Tab. I- 1 : Résumé des limitations des outils disponibles de simulation de la température moyenne radiante (source : Rakha, 2015)

Paquet de logiciel	Limitations de simulation de TMR
CityComfort+	- Pas de variation au niveau de la catégorisation des surfaces d’ombre et pas de résolution spatiale.
ENVI-met	- A base de pixels, pas de géométrie vectorielle. - Demande trop de puissance de calcul et beaucoup de temps.
RayMan	- Limité avec les angles solaires bas. - Limité en termes de rayonnement solaire diffus et réfléchi.
SOLWEIG	- Géométrie simplifiée. - Limitée en termes de densité simulée.

• **Evaluation du confort thermique dans le design urbain : la rue linéaire**

Une nouvelle approche d’évaluation et d’amélioration du confort thermique dans **les milieux urbains** a été présenté et appliqué par I. V. Bajšanski 2015. Cette approche présente la combinaison de la modélisation 3D, la conception paramétrique et l’analyse de l’environnement avec des logiciels familiers aux architectes et urbanistes afin de créer un outil de modélisation de la performance de la configuration urbaine dans l’étape de conception. Cette approche a été entreprise dans le but d’adopter des stratégies de mitigation face aux problèmes liés au confort.

D’autre part, pour évaluer le confort thermique extérieur, Bajšanski, suit une méthode paramétrique en utilisant Rhino/grasshopper, plus spécifiquement, un plug-in de grasshopper appelé ladybug, où l’effet du design urbain sur la sensation thermique a été analysé au niveau de trois voies urbaines linéaires, et dans une configuration non-linéaire des voies sans végétation à Novi Sad dans la partie nord de la république de la Serbie (45°15’ N et 19°50’ E). Cette méthode peut être résumée dans le diagramme (**Fig I- 8**).

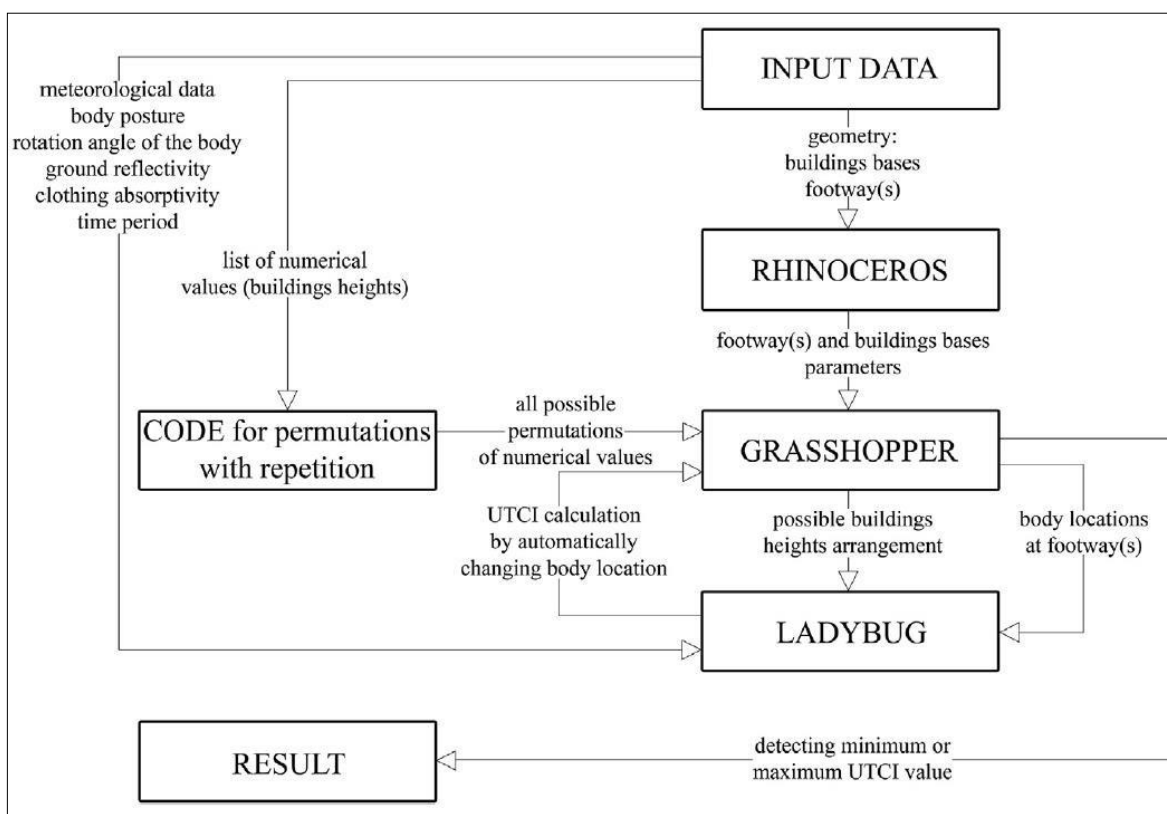


Fig I- 8 : Le flux des données entre les différents logiciels (Bajšanski et al, 2015)

L'évaluation du confort thermique dans le design urbain de **la rue linéaire** a montré qu'il y avait une diminution des températures de la journée la plus chaude d'été de l'ordre de 9.8 %. En revanche, le stress thermique pendant la période la plus froide en hiver a augmenté de l'ordre de 3,5 %. L'UTCI a diminué jusqu'à 6,1°C à 10 UTC quand on compare les designs urbains (actuels et projetés) pendant la journée la plus chaude d'été. Dans la journée la plus froide de l'hiver, une diminution plus importante de l'UTCI de 3,2°C a été observée à 11 UTC. Les changements maximums de l'UTCI sont enregistrés dans les zones ombrées.

L'Amélioration du confort thermique extérieur entre les plans futurs prévus et le design urbain proposé de **la rue linéaire** a pour conséquence la diminution de l'UTCI pouvant atteindre une valeur de 2.9°C dans la journée estivale, son augmentation va jusqu'à 1,7 °C dans la journée hivernale. **Quant à la rue non linéaire**, l'UTCI peut diminuer jusqu'à 3,9 °C dans la journée d'été et peut augmenter jusqu'à 10,1 °C dans la journée d'hiver.

Les procédures automatiques des algorithmes développés se sont avérées adaptées pour l'évaluation et l'amélioration du confort thermique extérieur. L'influence d'un seul bâtiment supplémentaire sur le confort thermique a été observée dans le logiciel et dans les résultats finaux. En prenant en considération les effets calculés de l'environnement bâti modifié sur le confort thermique extérieur, les zones urbaines avec un stress thermique extrême, de chaud ou de froid, peuvent être identifiées. Cette information pourrait être utile au début du processus de planification urbaine afin d'améliorer le confort thermique à l'extérieur par la création d'un design urbain optimisé.

En outre, il s'agit d'une contribution précieuse pour les stratégies de la planification urbaine en vue de contrecarrer les effets néfastes du microclimat en milieu urbain et le changement climatique quant à l'élévation de la température.

Conclusion

Le réchauffement climatique est une réalité aussi alarmiste que concrète. Le microclimat est aussi altéré pour devenir insoutenable, ceci est démontré par l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui s'avère comme phénomène urbain à surmonter. En parallèle, les domaines de la technologie et de l'informatique ont considérablement évolué pour être exploités au service de l'environnement pour garantir à l'homme dans son écosystème, le confort perceptible adéquat.

Cependant, le confort thermique est un état d'esprit qui est lié au climat, au microclimat, à la physiologie, au comportement et à la psychologie humaine comme on l'a constaté dans les travaux de Nikolopoulou. En tant que concepteurs, nous sommes appelés à connaître le niveau de confort dans les espaces que nous sommes en train de concevoir.

A cette fin, plusieurs études ont été conduites pour essayer de calculer, modéliser et simuler cette sensation- de confort thermique- et surtout de la quantifier. C'est dans ce contexte, que nous avons des indices de confort qui sont sur une échelle quantitative (palpable) au lieu de l'échelle qualitative. Dans cette optique, les scientifiques ont développé des équations des algorithmes et des approximations sur la base de modèles qui ont pour but de simplifier l'échange de chaleur entre l'être humain et son environnement. Ces modèles ont connu une évolution à travers le temps.

Après avoir défini les concepts clés '*microclimat urbain*' '*confort thermique extérieur*' et '*design paramétrique*', et avoir examiné les travaux antérieurs qui sont en

relation étroite à notre sujet, nous pouvons déduire que pour utiliser le design paramétrique comme outil servant à l'amélioration du confort thermique extérieur, nous avons plusieurs facteurs à prendre en considération.

Par ailleurs, il est impératif de sélectionner les outils informatiques adéquats pour la simulation du confort thermique résultant de la configuration urbaine générée, au fur et à mesure, dans toutes les étapes de la conception. Il existe des indices pour faire cette estimation mais elle relève seulement du domaine de la simulation. Bien sûr, nous avons la possibilité d'obtenir plusieurs niveaux de fidélité à la réalité, ou « d'exactitude » des résultats de la simulation. Mais, la demande en puissance de calcul augmente proportionnellement avec l'exactitude des résultats. Par conséquent la vitesse de calcul chute.

Si nous optons pour une solution de design par génération de différentes solutions dans un modèle évolutionnaire, nous aurons besoin de beaucoup de ressources en termes de puissance de calculs puisque l'algorithme va générer plusieurs scénarios et les examiner un par un afin de trouver le modèle le plus proche de notre but, pour concrétiser le meilleur confort thermique extérieur recherché.

Pour optimiser le temps requis par les calculs, nous devons-peut-être- sacrifier le niveau d'exactitude pour obtenir une vitesse en feedback qui va nous permettre d'obtenir une conception plus interactive.

Chapitre II

**Evaluation du confort thermique extérieur ;
Modèles physio-thermique**

Introduction

L'enjeu d'améliorer le confort thermique extérieur nécessite un bon contrôle des facteurs les plus déterminants qui peuvent l'influencer. Ce chapitre est dédié à clarifier ces facteurs et leur impact sur le confort thermique, ensuite à définir ceux qui sont manipulables dans la phase du design urbain. De là, il nous semble nécessaire d'avoir des indices représentatifs du confort et qui soient rapides à simuler. Ce qui nous permettrait d'évaluer l'impact de la configuration urbaine sur le confort thermique extérieur d'une façon interactive. Ainsi, nous pourrions diriger la conception vers les solutions qui pourront garantir le meilleur confort thermique.

Plusieurs études scientifiques relatives au confort thermique extérieur existent dans la littérature, elles ont connu un grand développement depuis les années 90. Cependant il est important de préciser que la majorité de ces études portent exclusivement sur l'évaluation du confort thermique à l'intérieur des bâtiments. Selon (K. Fabbri, 2015), tout a commencé grâce aux efforts de (A. P. Gagge, 1936) qui a le mérite d'avoir écrit l'équation du premier principe de la thermodynamique du corps humain sur la base du traitement des données expérimentales de la relation du corps humain avec son environnement.

II.1. Modèles physio-thermique du confort

Les conditions bioclimatiques de l'être humain ont été étudiées extensivement, avec plus de 100 indices d'évaluation développés durant le siècle passé (K. Błazejczyk et al., 2013). Bien que la majorité de ces indices sont utilisés à des fins spécifiques. Il y a trois indices fréquemment utilisés pour évaluer le confort thermique.

Initialement les recherches se sont concentrées sur le confort thermique intérieur, dans un environnement contrôlé. Ensuite, des efforts ont été déployés dans le but d'adapter les indices existants dans le confort thermique extérieur.

II.1.1. Predicted Mean Vote (PMV)

Le PMV est un modèle de transfert de chaleur basé sur un seul nœud, qui admet que la température de la peau est constante à 34°C. Ce modèle résout l'équation de l'équilibre de chaleur basée sur le dégagement de la chaleur du corps humain, l'isolation des vêtements, la perte de chaleur par respiration et la chaleur latente et sensible. Celui-ci a été développé

pour évaluer le confort thermique dans les espaces industriels contrôlés en terme de chauffage, de ventilation et de conditionnement de l'air (HVAC) (P. O. Fanger, 1970). Toutefois le PMV ne prend pas en considération les réactions de régulation thermique, tels que la transpiration et le frissonnement. Dès lors cet indice reste limité dans certains cas d'évaluation de confort thermique intérieur et extérieur (P. Höppe, 2002).

II.1.2. Physiological Equivalent Temperature (PET)

Le PET est un indice qui considère tous les processus de thermorégulation (P. Höppe, 1993), basé sur un modèle thermo-physiologique d'équilibre thermique appelé «Munich Energy balance Model for Individuals» (MEMI) (P. Höppe, 1984, 1999).

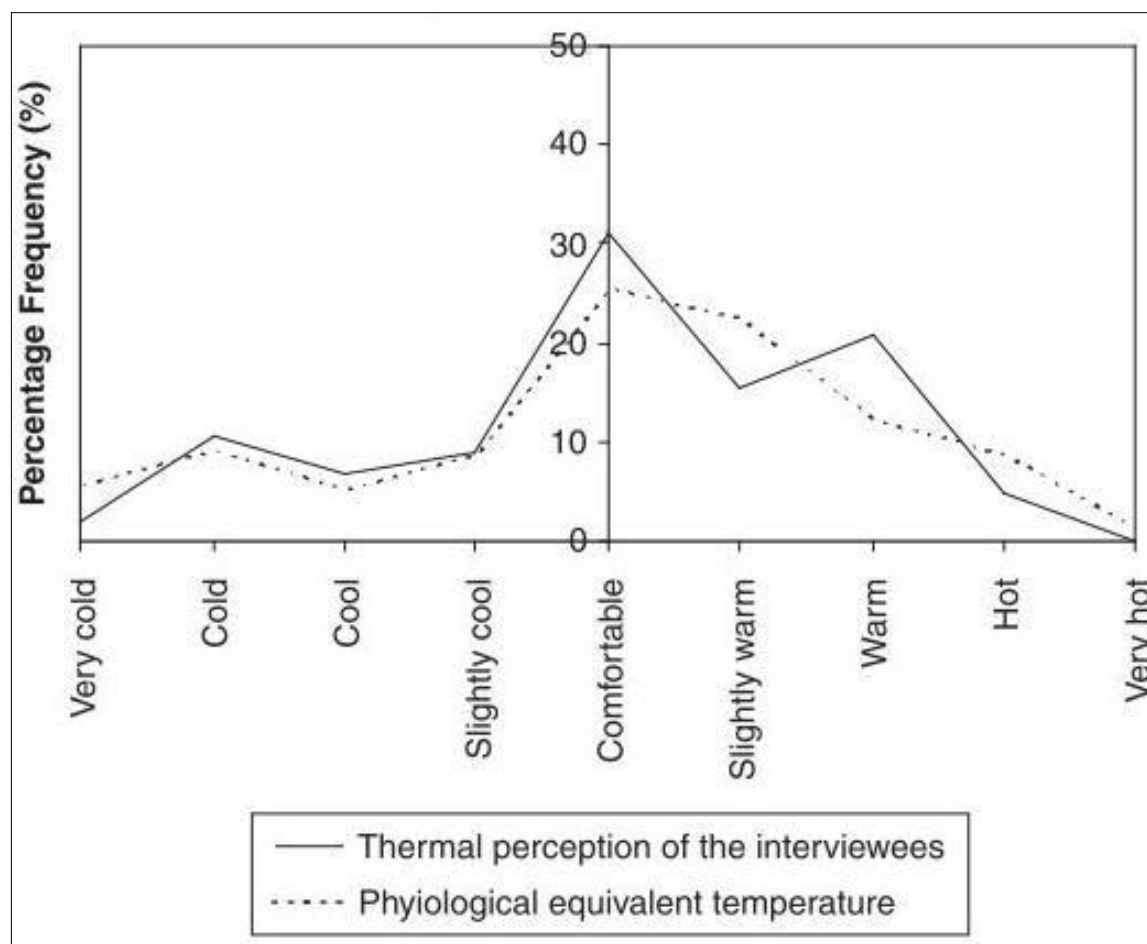


Fig II- 1: Distribution de fréquence de pourcentage de la perception thermique des interviewés et le PET calculé à Matsudo Central park (Source: Thorsson et al. 2007)

Selon (P. Höppe, 1999; H. Mayer & P. Höppe, 1987), le PET est défini comme étant l'équivalent de la température à laquelle, dans des conditions d'intérieur typique, l'équilibre thermique du corps humain existe (le métabolisme de travail 80 W d'une activité légère, et un l'habillement de 0,9 Clo). Les suppositions suivantes sont faites pour une ambiance intérieure de référence : la température moyenne radiante est égale à la température de l'air ($T_{mrt} = T_a$). La vitesse de l'air est fixée à 0,1 m/s. La pression de vapeur d'eau est définie quant à elle à 12 hPa (approximativement, c'est l'équivalent d'une humidité relative de 50 % à $T_a = 20^\circ\text{C}$). Bien que le PET représente la température équivalente dans les conditions d'une ambiance intérieure virtuelle, il est applicable à une large gamme de conditions extérieures. Le PET est l'un des indices recommandés dans les lignes directrices allemandes de planification urbaine (VDI 1998). En utilisant le logiciel RayMan développé par Matzarakis et al. (2007), le PET peut être calculé facilement. La comparaison entre les deux indices d'évaluation du confort le PET et le PMV est présentée dans (**Tab. II. 1**). L'intervalle de perception thermique et le stress physiologique des deux indices sont également indiqués. En tant qu'applications de PET : (A. Matzarakis et al., 1999).

Tab. II. 1. les gammes du PMV et PET pour différents degrés de perception thermique et stress physiologique (Source: A. Matzarakis et al., 1999).

PMV	PET ($^\circ\text{C}$)	Perception thermique	Degré de stress physiologique
-3,5	4	Très froid	Extrême stress de froid
		Froid	Fort stress de froid
-2,5	8	Frais	Stress de froid modéré
-1,5	13	Légèrement frais	Leger stress de froid
0,5	18	Confortable	Pas de stress thermique
0,5	23	Légèrement Chaud	Leger stress de chaleur
1,5	29	Modéré	Stress de chaleur modéré
2,5	35	Chaud	Fort stress de chaleur
3,5	41	Très chaud	Extrême stress de chaleur

S. Thorsson et al. ont étudié la relation entre le confort thermique et les activités extérieures dans une ville satellite près de Tokyo. La comparaison des résultats du questionnaire et l'évaluation du PET dans un parc urbain (cf. Fig II- 1).

Le PET montre une bonne concordance avec la perception des personnes interrogées. C'est supérieur à celui indiqué lorsque le PMV est utilisé comme indice de confort (Fig II- 2).

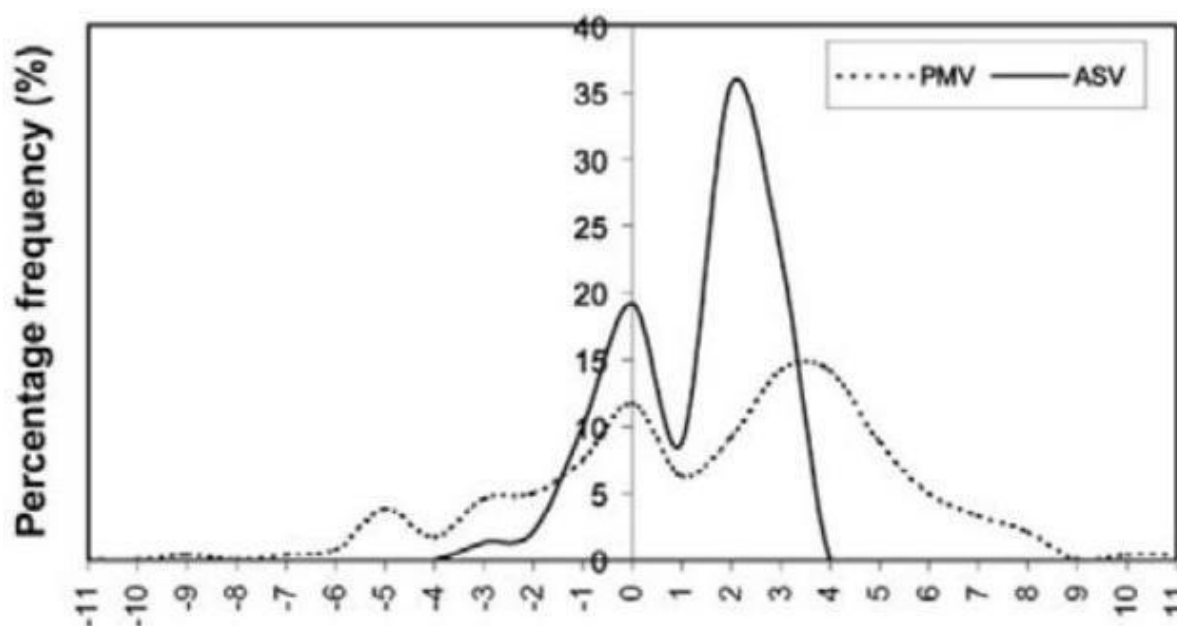


Fig II- 2 : Distribution du pourcentage de fréquence pour la perception thermique prédit par le (PMV) et la perception thermique des interviewés (ASV) (Source : Thorsson et al., 2004).

II.1.3. New Standard Effective Temperature (SET*)

Le SET* est un modèle de transfert de chaleur à deux nœuds (A. P. Gagge et al., 1986). Pour effectuer la modélisation le SET* divise la personne en noyau et périphérie. New Standard Effective Temperature SET* est l'extension de la New Effective Temperature ET*(A. P. Gagge, 1971), et c'est l'équivalent de la température dans un environnement où le sujet aura la même humidité de la peau et la température moyenne de la peau.

II.1.4. Outdoor New Standard Effective Temperature (OUT_SET*)

(J. Pickup & R. de Dear, 1999) ont fait une adaptation de la New Standard Effective Temperature (SET*) pour l'utiliser dans l'évaluation du confort thermique extérieur. La

différence majeure entre l'évaluation extérieure et l'évaluation l'intérieur réside dans les rayonnements infrarouges. Ils ont développé la Outdoor Mean Radiant Temperature (OUT_MRT), un modèle qui calcule la température de la surface uniforme d'une enceinte fermée entourant un sujet debout et en train d'échanger le même rayonnement infrarouge avec ce dernier de la même façon qu'avec le soleil et l'environnement infrarouge réel. Cet indice appelé Outdoor New Standard Effective Temperature (OUT_SET*) donne une représentation valide du confort thermique extérieur.

II.1.5. Universal Thermal Climate Index (UTCI)

Avec la participation de 45 scientifiques de 23 pays en plus du support de la « European Cooperation in Science and Technology » (COST), des développements et des études de validation ont été menés principalement en Europe. Pour que ce modèle soit acceptable dans d'autres climats et d'autres cultures dans le monde, on aura besoin de plus de validations.

II.1.5.1. Bases physiologiques

En 2010, (Błażejczyk et al) ont expliqué que bien qu'il y ait des modèles thermo-physiologiques qui ont dépassé plusieurs épreuves, ils sont généralement limités dans un intervalle de conditions environnementales. Chez l'Homme, il est crucial que sa température ne soit pas très loin de 37°C pour assurer le bon fonctionnement des organes internes et le cerveau. Par contre, la température de l'enveloppe extérieure du corps peut varier dans un intervalle plus vaste, en proportion avec les conditions extérieures, ce qui constitue l'un des mécanismes qui gèrent la production et la perte de la chaleur. Par exemple : afin de réduire le changement de la quantité de la chaleur dans le corps (S) à zéro, la chaleur est produite par le métabolisme (M) et toute activité musculaire (W). Le surplus doit être dégagé vers l'extérieur. L'échange de la chaleur peut être conduit par convection (Chaleur sensible-C), conduction (contact avec les solides-K), évaporation (flux de chaleur latente-E), rayonnement (ondes courtes et longues-Q), et respiration (latente et sensible-Res). L'échange de chaleur entre le corps humain et son environnement est décrit sous forme d'une équation de balance énergétique (**Eq. II-1**):

$$M + W + C + K + E + Q + Res \pm S = 0$$

(Eq. II-1)

Source : K. Błażejczyk et al.,
2010)

II.1.5.2. Modèle de Fiala

Une version spéciale du modèle multi-nodal de Fiala a été préparée pour le « COST action 730 ». Dans ce modèle, l'organisme humain peut être séparé en deux systèmes de thermorégulation interconnectés qui interagissent :

1. Le système actif de contrôle qui comporte les réactions thermorégulatrices de frissonnement thermo-générateur, transpiration, et la circulation cutanée du sang (vasomotricité cutanée).

2. Le système passif contrôlé qui gère le transfert de chaleur à l'intérieur et à la surface du corps. En outre, ce système contient un modèle de confort thermique qui prédit les réponses perceptives dynamiquement par rapport à l'état physiologique.

Le système passif est une représentation multicouche et multisegments du corps humain avec les informations des propriétés anatomiques et physiologiques. Le modèle représente une personne moyenne qui pèse 73,5 kg, teneur en graisse du corps de 14%, et une surface corporelle de 1,86 m². Le corps est idéalisé sous forme d'éléments sphériques et cylindriques, chacun est composé de tissus en couronnes concentriques avec des propriétés thermodynamiques et des fonctions physiologiques adéquates (D. Fiala et al., 1999). Les éléments du corps sont subdivisés davantage en secteurs spatiaux et nœuds individuels de tissu. Le système passif du modèle UTCI contient 12 éléments du corps qui contiennent 187 nœuds de tissu.

Le système actif du modèle « UTCI-Fiala » prédit les réactions thermorégulatrices du système nerveux central, le système actif a été développé par le biais de la régression statistique (D. Fiala et al., 2001) en utilisant les données mesurées obtenues d'une variété d'expériences qui couvrent les conditions : froid aigu, froid, modéré, chaud et très chaud avec des niveaux d'activité qui atteignent l'exercice intense, en état statique et transitoire.

Le modèle de Fiala prédit la réponse perceptuelle à partir des états physiologiques du corps humain (Fiala et al. 2003). Les expériences du confort avec 2000 sujets (mâles et femelles), couvrent un large intervalle de températures environnementales, humidités relatives, et niveaux d'activités statiques et transitoires utilisé pour dériver «Dynamic Thermal Sensation», le modèle DTS (basé sur l'échelle à sept points d'ASHRAE qui va de -3 pour froid vers +3 pour chaud)

II.1.5.3. Universal Thermal Climate Index UTCI ; Définition

Universal Thermal Climate Index est défini par (K. Błazejczyk et al., 2010) comme étant la température de l'air (T_a) de conditions de référence qui causent la même réaction chez le modèle que dans les conditions réelles. Ainsi, UTCI est la température de l'air qui va produire sous des conditions de référence la même contrainte thermique qu'en environnement thermique réel. Les conditions de référence (métabolisme et résistance thermique des vêtements) sont définies comme suit :

- Une vitesse de l'air allant de 0,5 m/s à 10 m de hauteur (approximativement de 0,3 m/s à 1,1 m).
- Une Température moyenne radiante (T_{mrt}) égale à la température de l'air.
- Une pression de vapeur (v_p) qui représente une humidité relative de 50% ; aux températures élevées ($>29^{\circ}\text{C}$) l'humidité de référence a été prise comme constante de 20 hPa.
- Une activité représentative équivalente à celle d'une personne qui marche à une vitesse de 4 km/h (1,1 m/s). Cela produit un métabolisme de 2,3 MET ($135 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$).

L'ajustement de l'isolation vestimentaire est une réaction effective envers les changements des conditions climatiques. Ainsi, la philosophie de l'Universal Thermal Comfort Index était de considérer l'adaptation saisonnière de l'habillement des Européens sur la base des données valables grâce aux mesures sur terrain afin d'avoir une représentation réaliste du comportement. Cette action affecte considérablement la perception de l'être humain envers son environnement extérieur. L'analyse en régression des données publiées voir : (H. G. Jendritzky Greg, Dear de Ronald et al., 2009), en plus des résultats de mesures sur terrain non-publiés fait en Pologne et en Suisse ont révélé, qu'il y a une relation entre l'isolation vestimentaire et la température de l'air, et on peut

l'écrire sous forme d'équation :

$$I_{cl} = 1,374 - 0,013847 \cdot Ta - 0,00043804 \cdot Ta^2 - 0,0000238383 \cdot Ta^3$$

(Eq. II-2 source:
K. Błazejczyk et
al., 2010)

La vitesse de l'air est un autre facteur qui doit être pris en considération à cause du mouvement du corps qui réduit l'isolation vestimentaire et affecte les réactions physiologiques du modèle (Havenith, Nilsson, 2004 ; Holmér et al. 1999 ; ISO 9920 ; ISO 11079). Ainsi, l'ajustement du modèle de l'habillement par rapport à la température et le vent est présenté dans le graphe de la (Fig II- 3).

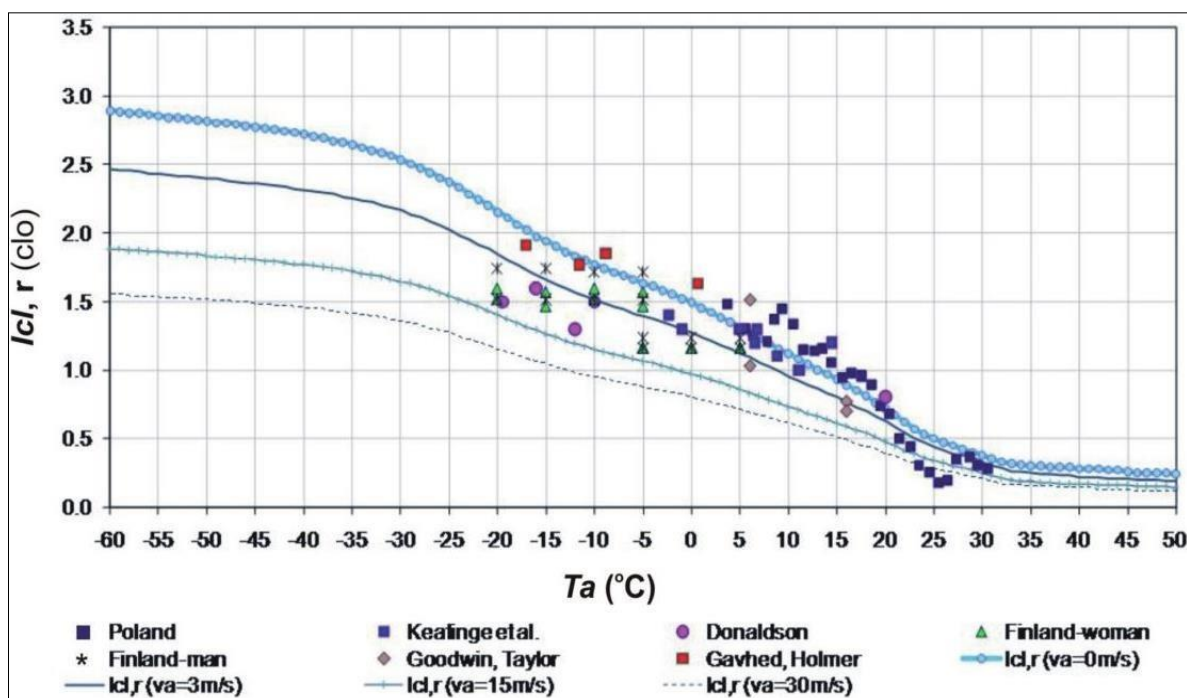


Fig II- 3: Valeurs d'isolation thermique globale pour différentes températures ambiantes et vitesse du vent (en référence à 10m au-dessus du sol) : $I_{cl, r}$ = isolation résultante des vêtements. Source (Błazejczyk et al. 2010).

II.1.5.3.1. Modelage statistique du « UTCI »

UTCI a pour but ultime de développer une quantité monodimensionnelle qui reflète adéquatement la réaction physiologique humaine envers les conditions thermiques réelles définies multi-dimensionnellement. Comme illustré dans la (Fig II- 4), la valeur de l'indice sera calculée à partir de la sortie dynamique multi variable de ce modèle.

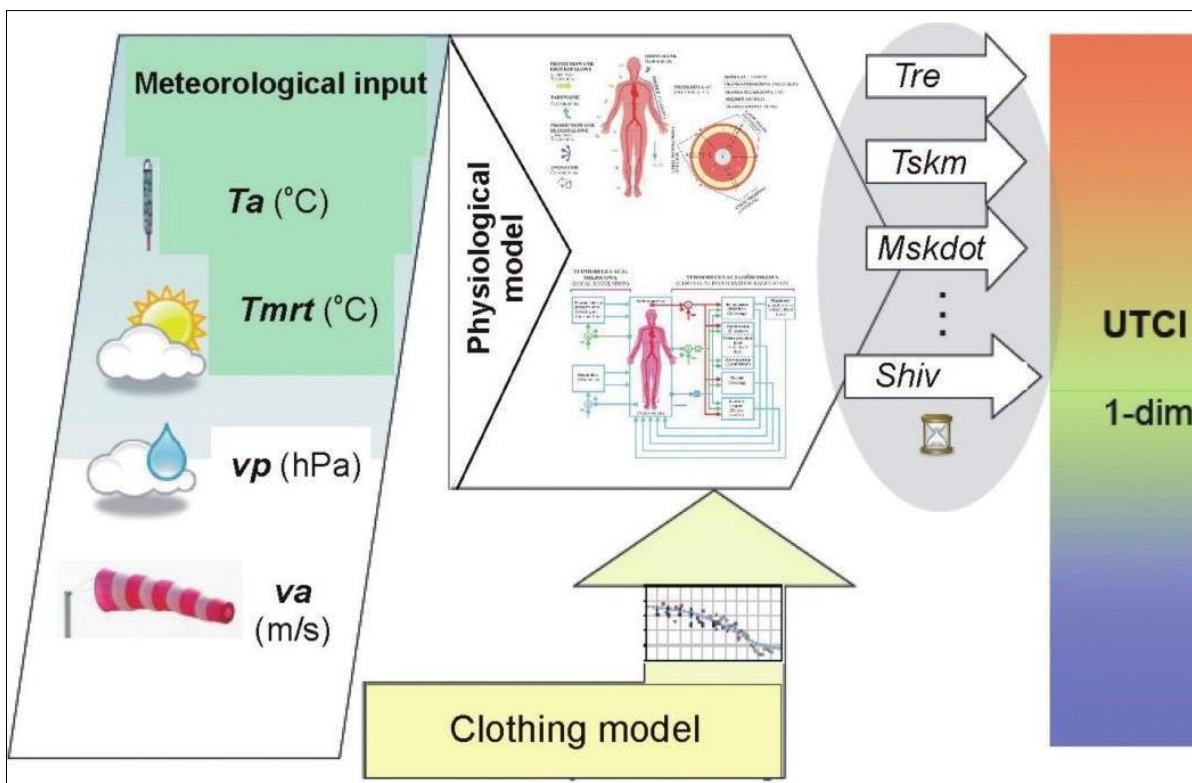


Fig II- 4 : Schéma de l'évaluation climatique par UTCI calculé à partir de sortie dynamique du modèle thermo-physiologique augmenté par le modèle d'habillement (Source: Blazejczyk et al. 2010).

Dans les applications de routine, les calculs d'UTCI ne peuvent pas être obtenus en temps réel en exécutant le modèle physiologique puisqu'il prend beaucoup de temps pour faire des calculs répétitifs. Ainsi, nous avons une approche alternative, il s'agit d'une équation d'approximation régressive pour accélérer les calculs de l'UTCI sans avoir besoin d'exécuter le modèle physiologique d'une façon répétitive mais plutôt l'exécution d'un seul calcul en considérant et en validant toutes les conditions.

Le décalage entre UTCI et T_a ($UTCI-T_a$) a été approximé en utilisant le polynomial dans T_a , v_a , v_p , $T_{mrt}-T_a$ incluant les principaux termes d'effet et d'interaction jusqu'au 6^{ème} ordre (H. G. Jendritzky Greg, Dear de Ronald et al., 2009). La racine carrée de la

moyenne des erreurs était équivalente à $1,1^{\circ}\text{C}$, 50% des erreurs observées dans l'intervalle de $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$, 80% dans l'intervalle de $\pm 1,3^{\circ}\text{C}$, 90% dans l'intervalle de $\pm 1,9^{\circ}\text{C}$.

Selon (K. Błażejczyk et al., 2010), l'UTCI est élaboré pour viser les objectifs suivants :

1. Avoir une bonne représentation thermo-physiologique de l'éventail complet de l'échange thermique.
2. Être applicable pour les calculs de l'ensemble du corps humain, mais aussi pour le refroidissement local de la peau (engelures).
3. Être Valide dans tous climats, toutes les saisons, toutes échelles du micro au macro.
4. Être Utile pour les applications clés en matière de biométéorologie, par exemple dans les services météorologiques, Public Health Service, planification de précaution, la recherche sur l'Impact Climatique.
5. Représente un indice sous forme d'échelle de températures.

Alors la question qui se pose est la suivante : quel indice de confort devons-nous utiliser ? Selon (T. Rakha, 2015). Les standards proposés par des organismes tels que ASHRAE et ISO sont en faveur du PMV pour une évaluation du confort à l'intérieur. Toutefois, cela n'est pas valable dans le contexte du confort thermique extérieur comme on l'a discuté précédemment. Outside Standard Effective Temperature « OUTSET » est basé sur des modèles d'équilibre énergétique pour un corps humain dans un régime permanent. Il est donc utilisable surtout quand les sujets vont demeurer à l'extérieur pour de longues durées (P. Höppe, 2002).

En conséquence l'UTCI est l'indice le plus adéquat, car il est conçu spécialement pour être capable d'interpréter les réactions thermorégulatrices de l'être humain dans le milieu extérieur (G. Jendritzky et al., 2012). Les trois indices de confort thermique ainsi que beaucoup d'autres sont disponibles sous forme de produits inclus dans plusieurs ensembles de logiciels de simulation pour aider les concepteurs à prendre des décisions fondées sur des informations utiles en utilisant l'informatique (**Fig II- 5**).

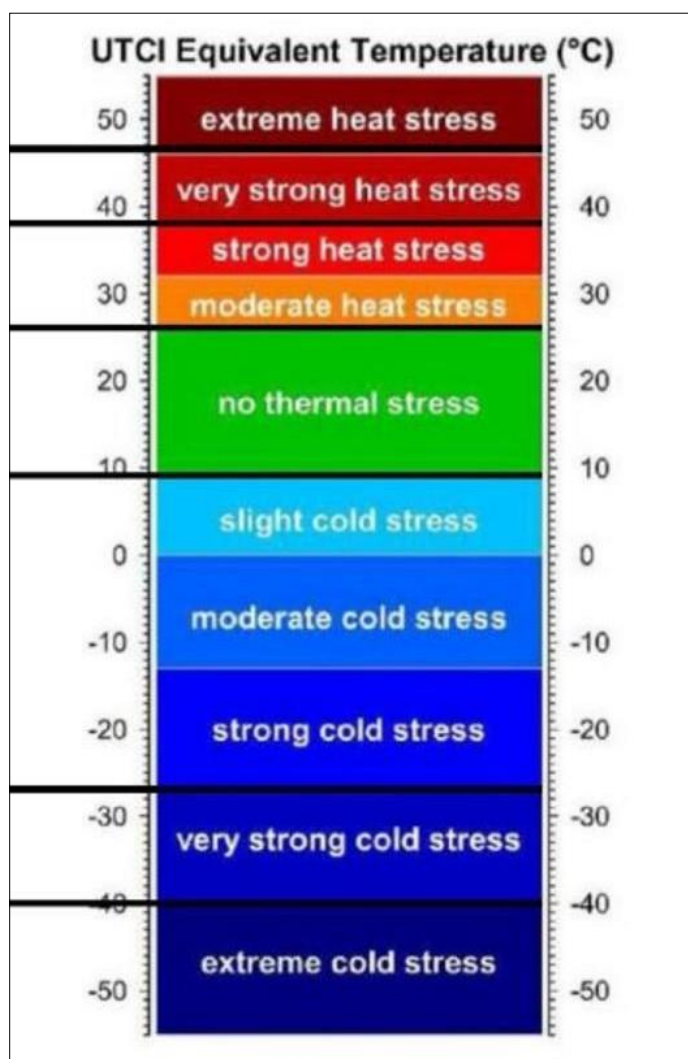


Fig II- 5: Échelle de niveaux de stress thermique basée sur l'UTCI. (E. Redon, 2017)

T. Rakha, en 2015 résume que plusieurs outils de simulation ont été développés précédemment pour simuler le microclimat urbain, avec un accent particulier mis sur la TMR, car elle a une influence considérable sur la perte de chaleur de l'Homme (P. O. Fanger, 1970). La TMR en particulier est difficile à modéliser, car elle dépend du principe de transfert de chaleur pour produire la température surfacique le long de la période de l'analyse dans l'espace étudié. Elle nécessite aussi des aptitudes d'analyse géométrique afin de créer des facteurs de forme précis pour les nœuds de l'analyse pour retracer combien chaque nœud est exposé à toutes les surfaces environnantes (Cf. Fig II- 6), ainsi que le soleil et le ciel.

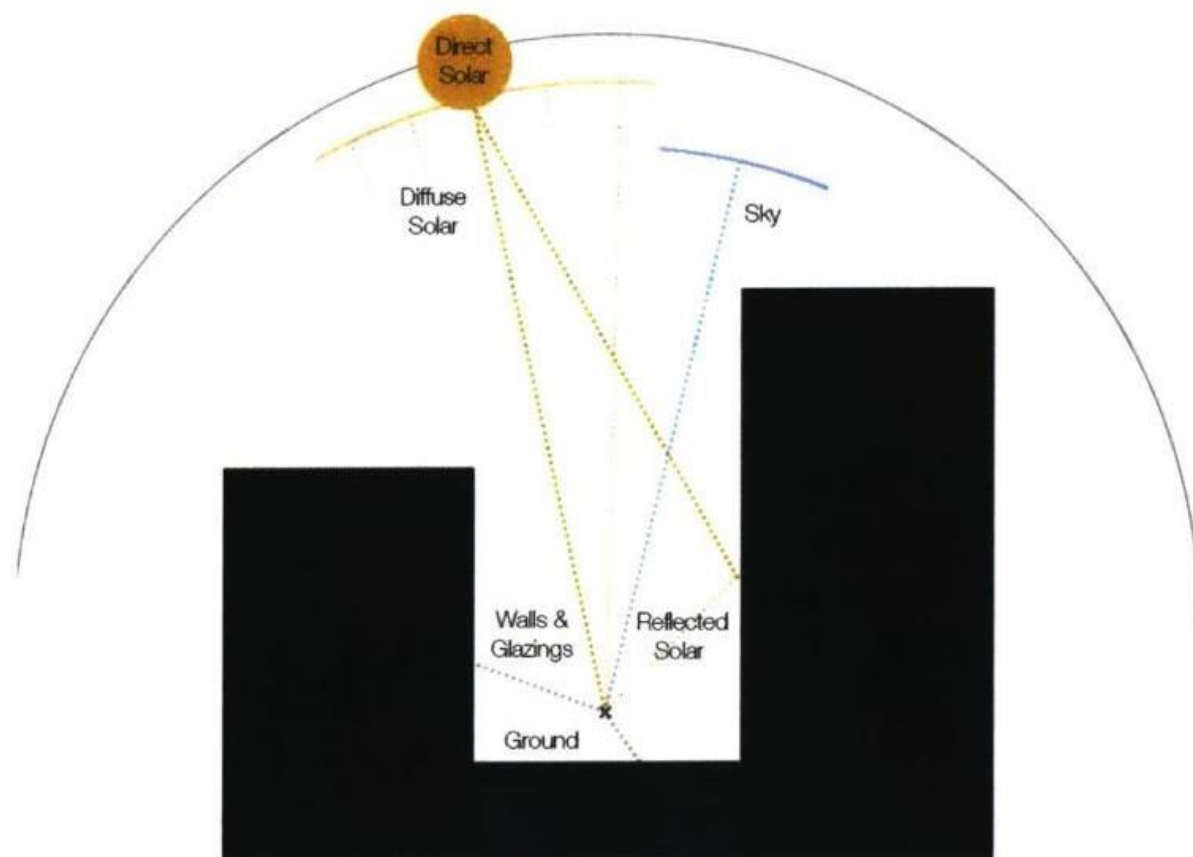


Fig II- 6 : L'environnement bâti et les paramètres environnementaux qui influencent la TMR (source : T. Rakha, 2015)

L'outil pertinent le plus récent pour modéliser la TMR avec précision est CityComfort+, qui a présenté une méthode pour simuler les variations spatiales de la TMR dans les environnements urbains denses (J. Huang et al., 2014).

II.1.2. Rayman

Le modèle de RayMan est une plate-forme de simulation qui vise à calculer les densités de flux de rayonnement, la durée d'ensoleillement, les espaces ombrés et les indices d'évaluation thermo-physiologiquement pertinents en utilisant seulement un nombre limité de données météorologiques (A. Matzarakis et al., 2010). Les limites du modèle sont l'incompatibilité avec les angles solaires bas et son incapacité à tenir compte du rayonnement réfléchi des ondes courtes.

II.1.3. SOLWEIG

Un autre développement est le modèle SOLWEIG (F. Lindberg et al., 2008), qui utilise des modèles numériques d'élévation « Digital Elevation Models » comme une entrée de la géométrie à base de pixels.

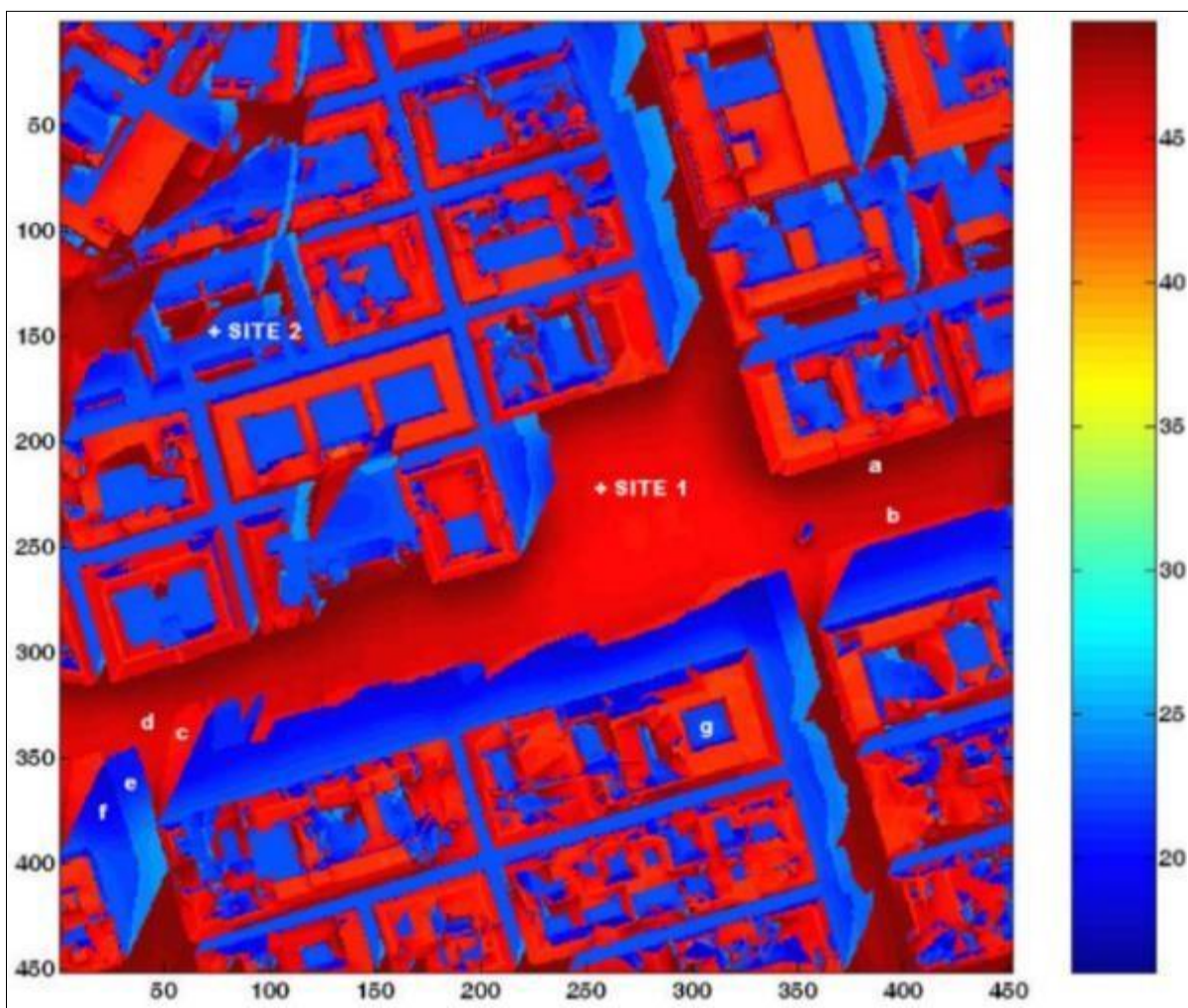


Fig II- 7 : Exemple de variation spatiale de la température moyenne radiant (Source : F. Lindberg et al., 2008)

Selon (F. Lindberg et al., 2008), SOLWEIG est un modèle du rayonnement solaire diffus et réfléchi sur la base des paramètres météorologique et la géométrie urbaine. Ainsi, il simule les variations spatiales des flux tridimensionnels du rayonnement et la TMR (Cf. **Fig II- 7**). Mais c'est également limité concernant la densité de simulée.

II.1.4. COMFA

S. Coccolo et al., en 2016 présentent COMFA comme suit : Le modèle COMFA a été développé par (R. D. Brown & T. J. Gillespie, 1995) en tant que modèle mathématique qui décrit l'équilibre énergétique de l'être humain sur la base de : la transpiration, le budget énergétique, la température du noyau du corps et la température de la peau où l'équation fondamentale (Eq. I-3) qui suit décrit ce modèle.

$$B = M + R_{RT} - C - E - L \quad (\text{Eq. II-3})$$

M : Chaleur métabolique générée par la personne (W.m^{-2}).

R_{RT} : Le rayonnement d'ondes longues et courtes.

C : Chaleur sensible perdue par convection (W.m^{-2}).

E : Perte de chaleur évaporatoire par respiration (W.m^{-2}).

L : Le rayonnement d'ondes longues émis par la personne (W.m^{-2}).

Le budget est exprimé par rapport à une échelle thermique à cinq points à partir de - 150 W.m^{-2} (nécessite beaucoup plus de chaleur) jusqu'à +150 W.m^{-2} (nécessite beaucoup plus de fraîcheur). Résumé dans le tableau (**Tab II- 2**)

Tab II- 2 : Sensation de confort et budget énergétique (source :A. Angelotti et al., 2007)

Budget énergétique	Sensation
Budget < -150 W/m^2	Très froid
-150 W/m^2 < Budget < -50 W/m^2	Froid
-50 W/m^2 < Budget < 50 W/m^2	Confort
50 W/m^2 < Budget < 150 W/m^2	Chaud
Budget > 150 W/m^2	Très chaud

Un modèle révisé permet de mieux calculer la sensation thermique des personnes qui exercent une grande activité métabolique, en redéfinissant les paramètres suivants : la résistance du tissu, la vitesse relative de l'air, la température de la peau, l'habillement et la résistance à la vapeur (N. A. Kenny et al., 2009a, 2009b; J. K. Vanos et al., 2012).

Puis une autre révision appelée COMFA+, un modèle qui considère l'impact de la forme urbaine dans le calcul du budget énergétique et introduit le Building View Factor (BVF) et le Ground View Factor (GVF) dans le calcul de R_{RT} (A. Angelotti et al., 2007).

Pour intégrer ce modèle dans le processus du design urbain paramétrique nous avons transcrit l'algorithme de calcul du modèle COMFA dans l'interface de grasshopper. Mais après quelques essais, on a constaté la durée prolongée pour le calcul du budget énergétique relatif à chaque point dans la grille d'analyse, ajoutant à cela ce modèle ne prend pas en charge l'adaptation de l'habillement des utilisateurs de l'espace extérieur.

II.1.5. ENVI-Met

Selon (T. Rakha, 2015), ENVI met est en développement continu, il peut calculer la TMR dans plusieurs situations urbaines, ainsi que d'autres aspects du microclimat tels que la vitesse et la direction du vent et des indices compréhensifs du confort thermique comme le PMV.

Néanmoins, il ne peut pas traiter les géométries vectorielles et fonctionne seulement selon une modélisation à base de pixels. Ce qui complique la tâche et rend le travail difficile, puisque les bâtiments, la topographie et la végétation sont modélisées sur des images raster, comme illustré (Cf. Fig II- 8). C'est également un flux coûteux en termes de puissance de calcul, où une simulation de 24 heures peut prendre 24 heures pour simuler, avec une limitation dans la prédiction du flux de rayonnement de grande longueur d'onde.

Il y a trois points forts de ENVI met, selon (F. Ali-Toudert, 2005)

- L'importance par 50 % de de la chaleur radiante du sol.
- Le SVF utilisé pour faire la différence entre les composantes de l'irradiation.
- La modélisation précise des ondes courtes de l'irradiation solaire.

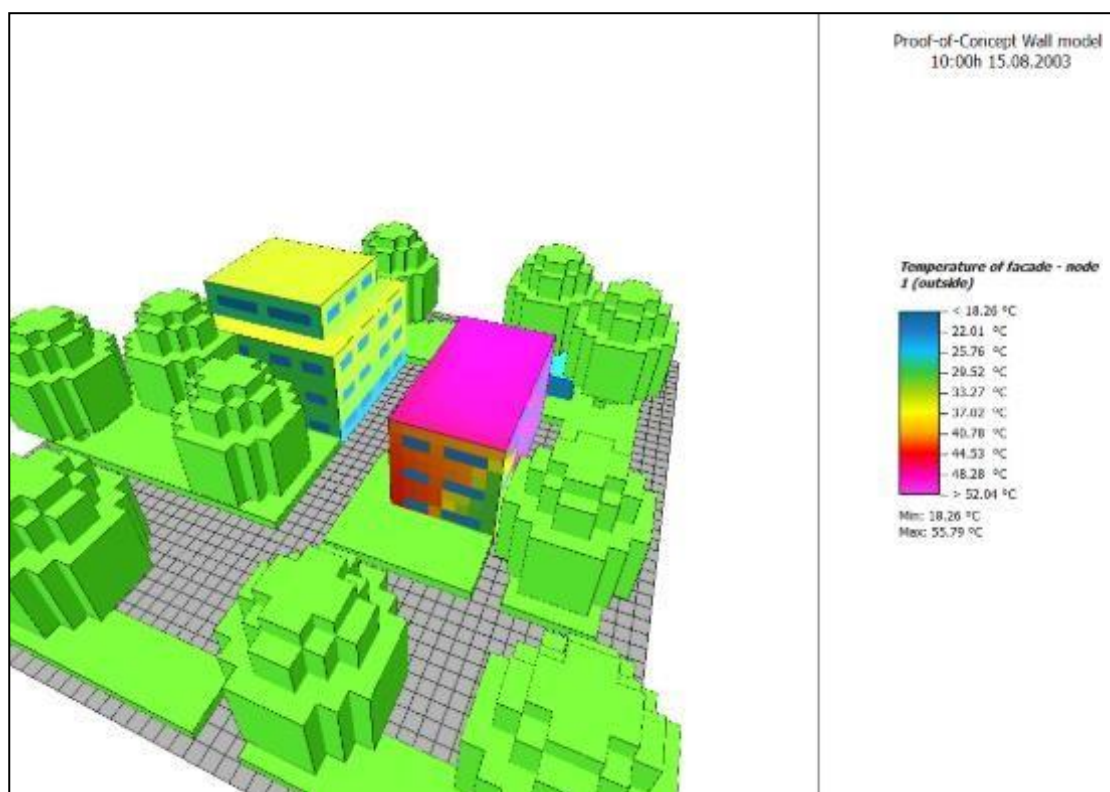


Fig II- 8 : Exemple de modélisation et simulation de la température de la façade extérieure, sous ENVIMET (source :H. Simon, 2016)

La méthode est rigoureuse et a trouvé une bonne concordance entre les données simulées et celles mesurées. Toutefois, le processus suppose que les surfaces urbaines se divisent en quatre catégorisations de parois ensoleillées et ombragées et de sol, sans résolution spatiale. Cela crée un manque dans les variations que les surfaces urbaines présentent en réalité par le biais de changement des valeurs de rayonnement à ondes courtes et ondes longues dans un espace ouvert. Celui-ci, pourrait être modélisé explicitement pour obtenir des représentations plus soignées et plus fiables, plus adaptées pour les interventions en urbanisme nuancé. ENVI-met est un paquet de logiciel open source, librement disponible qui se concentre sur les microclimats urbains (F. Ali-Toudert et al., 2005; T. Rakha, 2015)

II.1.6. Température moyenne radiante

La température radiante moyenne (T_{mrt}) est de plus en plus utilisée parmi les indicateurs du confort thermique. Le calcul de la somme des rayonnements en courtes et longues longueurs d'ondes reçues depuis le ciel et les surfaces environnantes pondérés par

les facteurs de vue correspondants. Thorsson et al. (2014) rapportent que la température radiante moyenne est un bon indicateur du risque de mortalité sous stress thermique. Grâce à l'effet d'ombrage des arbres, elle peut largement varier dans milieu bâti. Jusqu'à différences de 2.2°C, selon Streiling et Matzarakis (2003) dans une humidité relative d'air légèrement supérieure (+ 5 à 7 %), une réduction du PET autour de 17°C et près du double concernant la Tmrt (E. Redon, 2017, p. 24).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les paramètres du confort thermique et nous avons également expliqué quelques modèles physio-thermiques du confort pour mieux cerner le champ de notre recherche.

Parmi tant de modèles étudiés et exploités, nous avons trouvé que le modèle le plus adéquat pour le design paramétrique est celui de « Universal Thermal Climate Index » connu par (l'UTCI) pour les avantages qu'il présente que nous résumons dans les raisons suivantes :

- Il nécessite moins de données pour le calcul.
- Il y a un « component » pour le calculer sous Grasshopper.
- Il représente le confort avec un seul chiffre et pour toute personne présente dans l'espace.

Selon (T. Rakha, 2015). Pour le moment le (UTCI) est l'indice du confort thermique extérieur le plus récent qui utilise un modèle de thermorégulation multi-nodal (D. Fiala et al., 2012), en plus d'un modèle dynamique de vêtements qui imite le comportement de l'être humain par rapport à la température de l'air (G. Havenith et al., 2012).

Il existe une multitude d'autres méthodes qui ont été développées mais qui n'ont pas encore été scientifiquement validées par rapport à des données mesurées ou qui sont encore indisponibles pour un usage public. Jusqu'à aujourd'hui, les paquets disponibles ne produisent pas de résultats fiables dans un environnement de conception. Par conséquent, le développement des outils de simulation qui aident les concepteurs à explorer l'impact de leurs décisions sur divers aspects de microclimat extérieur, d'une manière relativement robuste et rapide, constitue de ce fait l'objet de ce travail.

Chapitre III

**Le microclimat urbain à l'épreuve du
Design Paramétrique**

Introduction

Après l'exposition et la compréhension des bases du confort extérieur, on aborde l'architecture paramétrique, un concept nouveau qui multiplie les possibilités architecturales dans la phase de conception.

Dans ce chapitre nous étudions donc le design paramétrique et la prise en compte du climat lors de toute conception architecturale ou urbanistique. Dans le but d'une meilleure compréhension et l'amélioration du confort thermique dans les espaces extérieures, le design paramétrique est utilisé comme outils d'étude et d'analyse du confort thermique dans les espaces extérieures.

Des outils de design paramétrique permettent la modélisation paramétrique. Dans ce chapitre, nous allons donc présenter : Grasshopper, le logiciel de choix qui a permis aux architectes d'accéder au domaine de la programmation, grâce à une interface visuelle. Ensuite vient Ladybug, un plug-in de Grasshopper qui propose un éventail d'outils d'évaluation des aspects thermique et énergétique du bâtiment ayant permis de considérer l'aspect du confort thermique dans le processus du design paramétrique.

S'engager dans un processus de conception paramétrique signifie le recours à l'utilisation d'algorithmes pour générer des formes qui respectent certaines règles fixées par le concepteur pour assurer que le produit final respecte convenablement quelques qualités que le concepteur juge importantes. Ces algorithmes représentent le langage commun entre le concepteur et l'ordinateur, une partie cruciale de l'équation du design paramétrique, la partie chargée de faire tous les calculs et simulations nécessaires pour tailler la forme du bâtiment de la façon que le concepteur désire.

Selon (E. Touloupaki & T. Theodosiou, 2017) la modélisation paramétrique et aussi importante pour diverses raisons:

- Les nouvelles générations d'architectes s'habituent de plus en plus aux processus numériques de génération et de représentation du design, démontrant ainsi une tendance globale à la conception algorithmique ou paramétrique dans la pratique architecturale et l'environnement académique.
- De nouveaux outils informatiques récemment développés, manifestent une puissante synergie, permettant une intégration intuitive de la simulation et de l'optimisation de la conception des bâtiments dans le logiciel de représentation

numérique, permettant ainsi un feedback du processus de synthèse en cours.

- La nécessité d'aborder simultanément des objectifs multiples et contradictoires, durant toutes les étapes du processus de conception, qui est devenue de plus en plus impérative, et ce qui rend la mise en place d'une approche holistique pour la conception de bâtiments durables une nécessité urgente.

Dans le design urbain paramétrique, il est assez indispensable de maîtriser l'interface et la procédure d'élaborer un algorithme autant qu'il est important de maîtriser la partie qui traite du confort thermique extérieur ainsi que son évaluation. Ceci nous offre la possibilité d'exploiter toutes les capacités du design paramétrique.

Dans le monde du design paramétrique le logiciel le plus réputé est un plug-in qui s'appelle Grasshopper sous le logiciel Rhinoceros destiné à la modélisation tridimensionnelle. Grasshopper est doté d'une interface conviviale et attirante qui présente les algorithmes d'habitude écrits sous une forme graphique. A titre de démonstration on a essayé d'écrire le programme de COMFA sous la forme d'algorithme visuel (voir annexe). L'algorithme de COMFA a été utilisé pour évaluer le confort thermique extérieur dans des recherches scientifiques comme (I. Boukhelkhal & F. Bourbia, 2016; H. Tebbani & Y. Bouchahm, 2016)

Le design paramétrique est pratiqué dans toutes les échelles de la ville, de l'urbanisme paramétrique à l'architecture paramétrique. Notre recherche va porter sur le design urbain paramétrique. Cependant pour une meilleure compréhension de cette nouvelle pratique on va faire le tour des concepts qui la constituent : design paramétrique et design urbain, et bien que les lecteurs de ce mémoire semblent avoir une bonne compréhension des bases de ce dernier, on va expliquer plus extensivement le design paramétrique en général puis on passera à quelques applications dans le design urbain paramétrique.

Le terme « paramétrique » dans design paramétrique est relativement nouveau dans le domaine de l'architecture et bien moins connu dans le domaine de l'architecture bioclimatique et il nécessite une petite explication avant d'approfondir le travail.

III.1. Design paramétrique

Lorsqu'on parle de design paramétrique, on sait pertinemment qu'il ne s'agit pas de design conventionnel. Brièvement, le design conventionnel est une pratique que tous les designers et, parmi eux, les architectes ont utilisé et perfectionné. Il s'agit d'un processus

qui utilise un outil principal, c'est le crayon et la feuille. Après cela, est venu l'ordinateur et le dessin assisté par l'ordinateur mais on est toujours dans le mode de design conventionnel, ajouter des formes ou les effacer. Et lorsqu'on efface une partie, on doit redessiner toutes les parties qui étaient en relation avec cette dernière.

Contrairement au design conventionnel, dans le design paramétrique l'architecte établit en premier lieu les relations entre les entités à l'aide d'un algorithme et là, quand il change une partie du design l'algorithme, il va garder ces relations intactes et changer les formes par conséquence (**Fig III- 1**) on ne peut même l'intégrer dans une page web online et obtenir un feedback en temps réel.

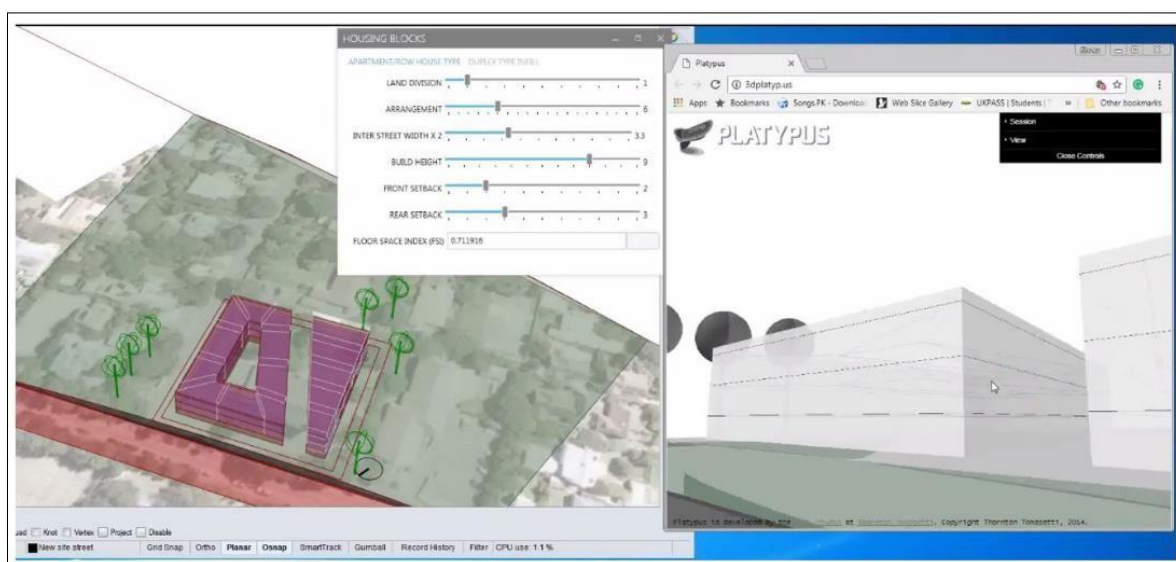


Fig III- 1 : Interface de page web pour générer des types d'habitation (Source : S. Chowdhury & M. A. Schnabel, 2018)

Pendant les quinze dernières années les outils numériques ont été utilisés de plusieurs manières et ont influencé le domaine de la conception et la construction. Au début ils ont été utilisés seulement pour la représentation. Suite à l'apparition des technologies numériques, ils ont été intégrés dans le de domaine de l'architecture comme un outil de conception (M. Stavric & O. Marina, 2011)

Pour changer de mode de design du conventionnel au paramétrique. L'architecte devrait être capable d'écrire un algorithme qui pourra exécuter des tâches qui sont à la fois séparées et interdépendantes en :

- Générant la géométrie en 3D de la forme urbaine à la base de quelques règles que le concepteur implémente auparavant, autrement dit, en générant : les masses, les voies, les espaces publics et la végétation.
- Evaluant l'effet de la configuration urbaine en question sur le confort thermique extérieur.
- Changeant la configuration urbaine dans le but d'améliorer le confort urbain extérieur.

Le schéma suivant illustre davantage ce concept (**Fig III- 2**).

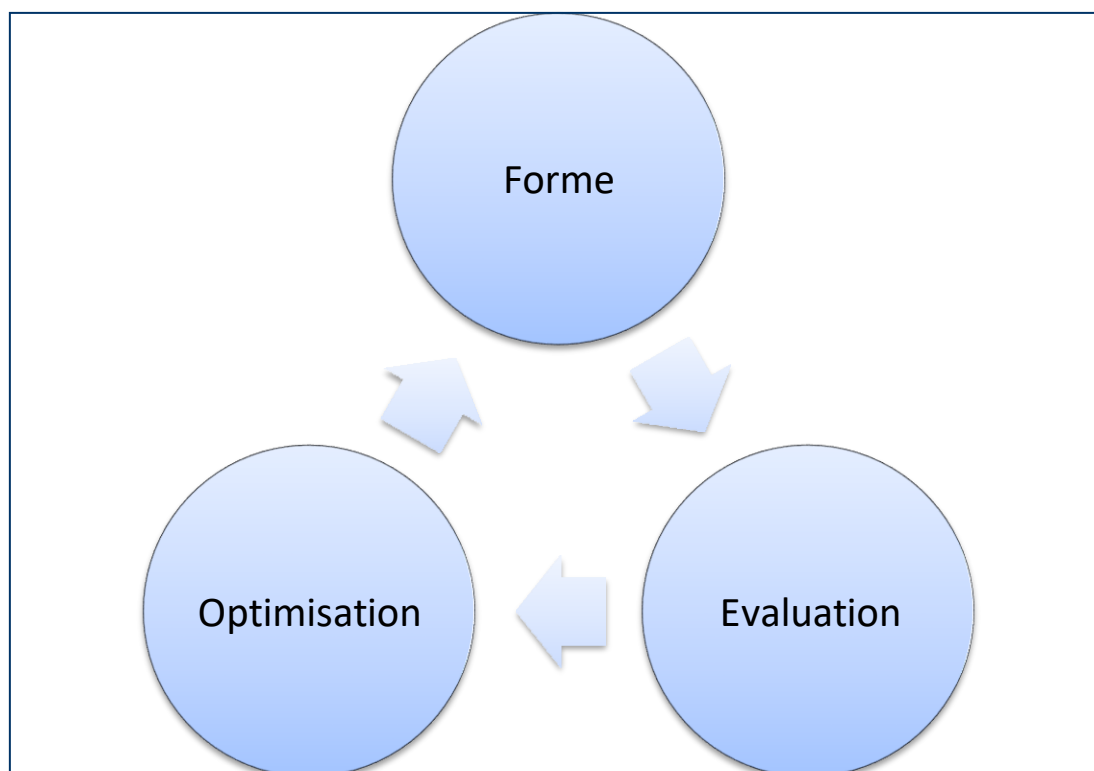


Fig III- 2 : Le workflow dans le design paramétrique

III.1.1.1. Niveaux du design paramétrique

Généralement, dans le design paramétrique la forme est obtenue à partir de valeurs des paramètres. Les relations entre les formes sont décrites par des équations. Ainsi, on peut établir géométriquement et mathématiquement des interdépendances parmi les formes et par conséquent leur comportement par rapport aux transformations. Les outils de design paramétrique ont influencé le développement de la conception architecturale numérique,

depuis 1990, et en distingue deux niveaux.

III.1.1.2. Outils conceptuels de design paramétrique :

Dans le design paramétrique conceptuel, on énonce des paramètres particuliers de la conception et non pas la forme. Par l'attribution des valeurs aux paramètres, on peut créer des objets ou des configurations. L'analyse de la représentation paramétrique et générative des bâtiments est basée soit sur la géométrie orthogonale ou curviligne. Cette puissance particulière est due la possibilité d'obtenir beaucoup de variété à partir de quelques valeurs numériques (DECOi, 2000; E. Prousalidou & S. Hanna, 2007)

Maya et Rhinoceros (avec Mel ou Rhino Script respectivement) parmi d'autres logiciels, offrent des éditeurs de script pour le design paramétrique. Maya a été développé pour l'industrie de cinéma (pour l'animation) mais récemment les architectes l'ont utilisé pour la l'élaboration conceptuelle. Cette méthode de conception demande une connaissance de la programmation et dépend profondément des algorithmes mathématiques, pour cela cette approche n'est pas interactive.

III.1.1.3. Outils constructifs du design paramétriques

Le design paramétrique constructif fait régence aux données intrinsèques d'un objet 3D prédéterminées. Ce concept paramétrique est réalisé dans plusieurs progiciels CAO comme Autodesk Revit, Soft Plan, Nemetschek, ArchiCAD et Chief Architect. Au lieu de dessiner un ensemble de lignes, arcs... etc. le concepteur peut insérer des composantes pré-dessinées, portes, fenêtres, éléments porteurs, escaliers, ou dalles ...etc. Dès lors, on obtient des maquettes 3D au lieu de dessins 2D. L'objectif de cette technologie est de réduire le temps de dessin et de corrections des plans en 2D. (M. Stavric & O. Marina, 2011)

Ces logiciels sont limités puisqu'ils sont basés sur la standardisation et demeurent inadéquats pour les projets ayant recours à l'architecture numérique et utilisant des formes non-standardisés.

III.1.1.4. Définition du paramétrique

Selon (N. Leach, 2014), le terme paramétrique est utilisé dans une variété de disciplines, des mathématiques au design. Littéralement, cela veut dire travailler dans des

paramètres d'un intervalle défini. Cependant, le domaine spécifique du design contemporain, il se réfère largement à l'utilisation de logiciels de modélisation paramétrique. Contrairement aux logiciels standards basés sur des objets géométriques de référence, le logiciel paramétrique lie les dimensions et les paramètres à la géométrie, permettant ainsi le réglage incrémental d'une partie qui, par conséquent, affecte l'ensemble. Par exemple, lorsqu'un point dans une courbe est repositionné, toute la courbe se réaligne. Les opérations qu'il facilite sont l'adaptation, le jumelage et le lissage. Il est donc utile non seulement dans la modélisation des formes individuelles mais aussi dans l'ensemble du domaine de l'urbanisme associatif. Le logiciel paramétrique se prête au design curviligne, comme dans le travail de Frank Gehry, Zaha Hadid et d'autres architectes dont le travail est caractérisé par la manipulation de la forme. En soi, cependant, le logiciel paramétrique n'a pas créé un nouveau vocabulaire de formes. On modélisait déjà par le biais de techniques analogiques bien avant l'introduction du logiciel paramétrique. Toutefois, ces techniques sont très efficaces pour les formes de remodelage, et permettent un meilleur contrôle dans le processus de conception. Ils fournissent également des informations plus précises pour les processus de fabrication numérique.

III.1.1.5. Définition de l'algorithmique

C'est un terme qui se réfère à l'utilisation de techniques procédurales dans la résolution de problèmes de conception. Techniquement, un algorithme est une instruction simple. Il concerne donc autant les processus de conception analogique standard que les processus de conception numérique. Dans le domaine de la conception numérique, cependant, il se réfère spécifiquement à l'utilisation de langages de programmation qui permettent au concepteur de dépasser les limites de l'interface d'utilisateur et de concevoir par la manipulation directe, non pas de forme mais de code. Typiquement, la conception algorithmique serait effectuée par le biais de langages de programmation tels que RhinoScript, MEL (langage incorporé Maya), Visual Basic ou 3dMaxScript. En revanche, en raison de la difficulté de la programmation, les applications : Composante Génératrice et Grasshopper contournent le code avec des formes pictographiques d'automatisation. Nous pourrions donc les décrire comme des formes d'écriture graphique. La conception algorithmique exploite la capacité de l'ordinateur à fonctionner comme un moteur de recherche et à effectuer des tâches qui, autrement, consommeraient un temps démesuré. Il se prête donc à l'optimisation et à d'autres tâches au-delà des limites des contraintes de

conception standard.

III.1.1.6. Paramétrique par rapport à algorithmique

Il y a maintenant une pratique très répandue, il s'agit de la confusion entre les deux termes, « paramétrique » et « algorithmique ». Ceci est en partie dû au fait que les deux techniques peuvent finir par produire des formes similaires. Le travail algorithmique généré à l'aide du Processing ou Rhino-script, par exemple, a souvent des formes curvilignes qui sont apparemment similaires au travail produit à l'aide d'outils paramétriques. Mais c'est aussi en partie dû au fait qu'il y a encore peu de compréhension réelle de ce que les termes signifient réellement au moins pour ceux qui sont moins familiers avec le monde de calcul intensif « computation ». Dans une certaine mesure, le terme « paramétrique » est devenu un moyen à court terme de mettre entre parenthèses une grande partie de la conception numérique qui semble être curviligne dans son expression esthétique, fournissant ainsi une expression pratique pour un nouveau style en architecture.

Disons donc clairement ici, que les techniques algorithmiques sont basées sur l'utilisation de commandes. Par ailleurs, les techniques paramétriques sont basées sur la manipulation de la forme. Ce sont donc des techniques assez distinctes.

En même temps, des techniques algorithmiques sont souvent utilisées en association avec des techniques paramétriques. Nous pourrions par exemple citer l'utilisation de certaines techniques algorithmiques pour générer la forme initiale qui est ensuite manipulée à l'aide de techniques paramétriques. Inversement, des techniques algorithmiques peuvent être utilisées pour l'optimisation et pour d'autres opérations dans une autre étape du processus de conception, une fois que la forme initiale générée a été modélisée à l'aide des techniques paramétriques.

III.1.1.7. Historique du modèle paramétrique

Le terme paramétrique trouve son origine dans les mathématiques, mais il y a un débat en ce moment sur où et quand les concepteurs ont-ils commencé à utiliser le mot.(D. J. Gerber, 2007) cité par (D. Davis, 2013).



Fig III- 3 : Dessin d'un rectangle à l'aide du modèle paramétrique (Source : D. Davis, 2013)

Un modèle paramétrique dans sa forme la plus simple est la description d'une forme géométrique à l'ordinateur non pas en utilisant des coordonnées mais des paramètres. Selon D. Davis, la première application a été introduite par Timothy Johnson dans une application pour dessiner sur un écran avec un stylet optique (au laboratoire Lincoln en 1964). Il a accompli cette tâche dans trois étapes. Dessin d'une forme approximative avec son stylet. Entrée des paramètres dans le modèle paramétrique et puis le modèle génère la forme régulière (cf. **Fig III- 3**).

III.1.2. Génération de la forme

Dans le design paramétrique on ne dessine pas une forme mais on la génère. La différence est fondamentale et elle se cristallise au niveau de l'outil utilisé pour avoir une forme. Le dessin classique nécessite un outil comme le crayon, bien que la génération d'une forme nécessite un algorithme. L'algorithme est l'ensemble d'étapes données à l'ordinateur pour accomplir une tâche quelconque. Pour générer une forme à l'aide d'un algorithme, on a besoin de données « inputs ». Beaucoup de tentatives ont été faites pour développer des démarches dans le but de générer la forme.

En 2011 (J. N. Beirão et al., ont proposé un processus de génération de la voirie et la forme urbaine intégrée dans une plateforme paramétrique interactive pour changer la configuration urbaine et les données qui y sont attachées. Mathématiquement, il s'agit de la division des rectangles selon une règle récursive dans la limite géométrique du site d'intervention (**Fig III- 4**).

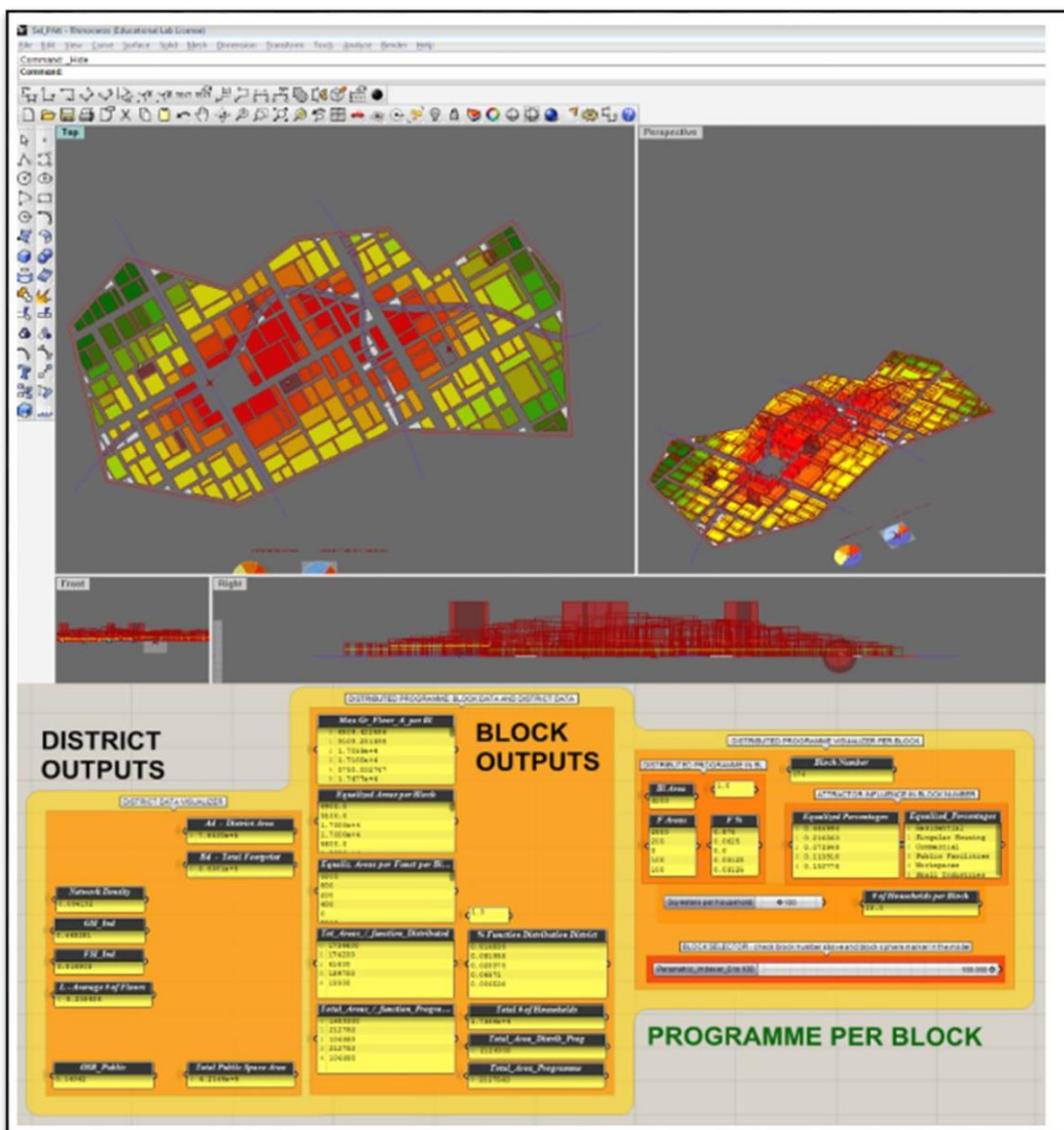


Fig III- 4 : Génération de la structure urbaine selon un générateur de forme récursif (Source : J. N. Beirão et al., 2011)

Dans sa recherche en 2011, Beirão et al, Proposent un système de design paramétrique conçu spécialement pour faciliter et automatiser plusieurs aspects de la conception urbaine à l'échelle du quartier, avec les conditions suivantes :

- Être applicable pour différents programmes spéciaux.
- Être interactif et responsif avec une bonne visualisation du plan de point de vue graphique en plus de l'aspect analytique de l'espace (indicateur numérique, indexes etc...)
- Être capable d'implémenter, intuitivement les caractères principaux de la composition spatiale du quartier dans le processus de la conception.

III.1.1. Plug-in Grasshopper

Grasshopper est un plug-in du logiciel de Dessin Assisté par l'Ordinateur (CAO) appelé Rhinoceros (**Fig III- 5**). Il s'agit d'une interface de programmation visuelle.

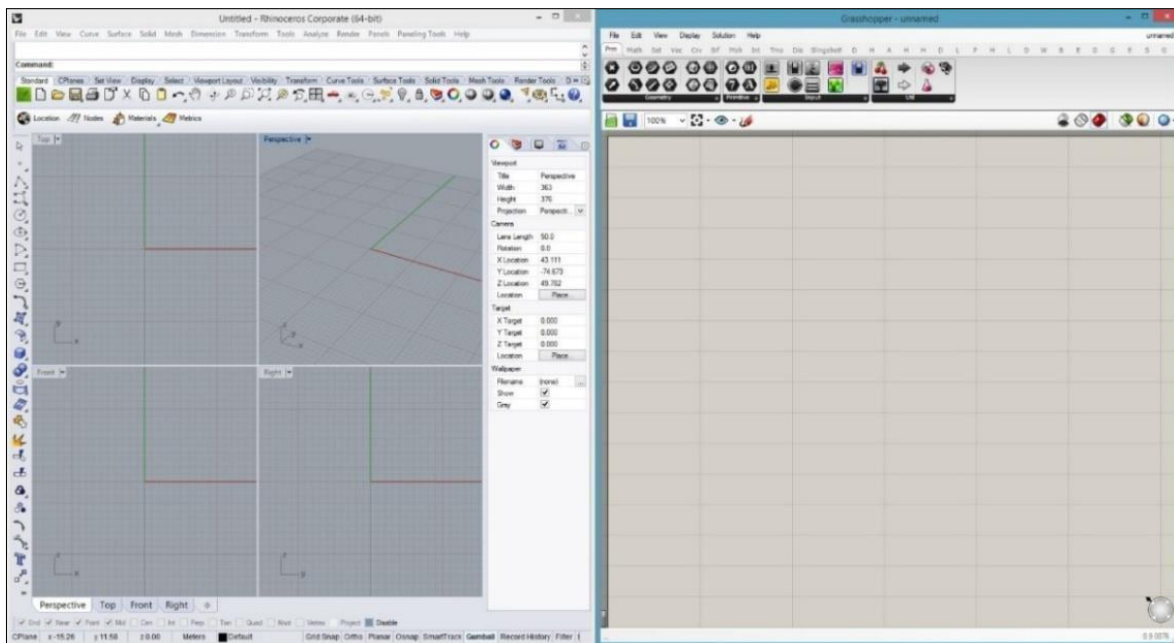


Fig III- 5 : L'interface de Rhinoceros et Grasshopper (source : auteur)

III.1.1.1. Génération de la structure urbaine

Koenig R en 2011, affirme que la structure de la ville est définie par six modèles (**Fig III- 6**). A cet effet, il a développé une méthode de simulation pour générer ces modèles, puis pouvoir les combiner ensemble pour obtenir des structures variées.

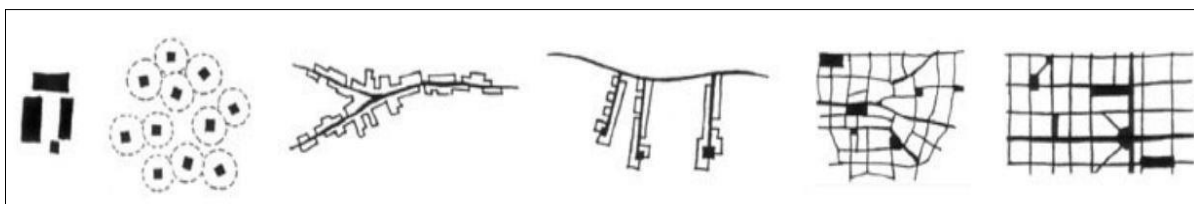


Fig III- 6 : Modèles de forme urbaine (Source : Koenig, 2011)

III.1.1.1. Cellular automata

Le système générative Cellular Automata a été le sujet d'un nombre de recherches sur les méthodes de design (E. Al-qattan et al., 2017). Il s'agit d'une grille infinie où chaque cellule est dans un des deux états possibles « vivante ou morte ». Cela est déterminé par les

huit cellules voisines dans les générations suivantes. Cette petite règle ouvre une infinité de configuration géométrique possible (Fig III- 7).

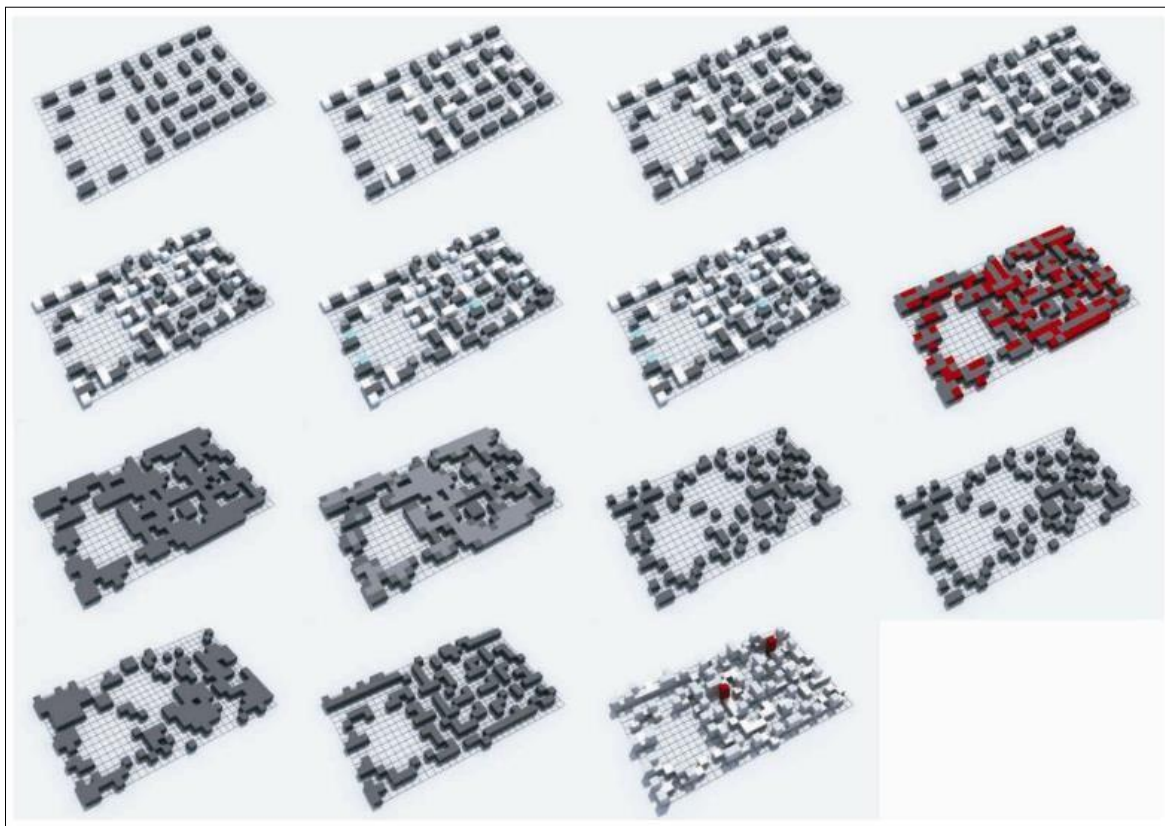


Fig III- 7 : Exemple de quelques configurations géométriques possibles générées par cellular automata (Source : M. Stavric & O. Marina, 2011)

Cet effet est illustré par « The game of life » introduite en Conway. Ce principe commence par une configuration bien plus simple et peu générer des configuration complexe et quelques règles. (Fig III- 9 08).

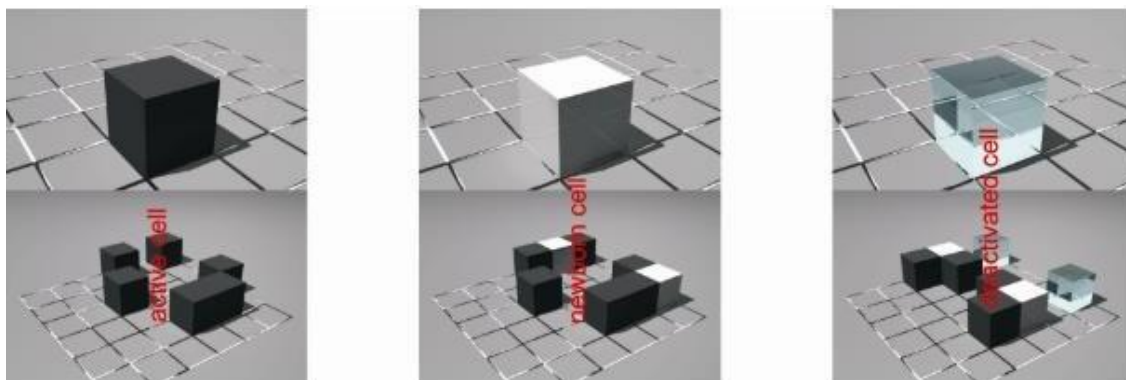


Fig III- 8 : Principe de la Cellular Automata (source : : M. Stavric & O. Marina, 2011)

III.1.2. Decoding Spaces

Un exemple intéressant du design paramétrique urbain se concrétise dans le component (Decoding spaces for grasshopper). Une approche de synthèse du tissu urbain avec des paramètres donnés a été proposée (**Fig III- 9**).

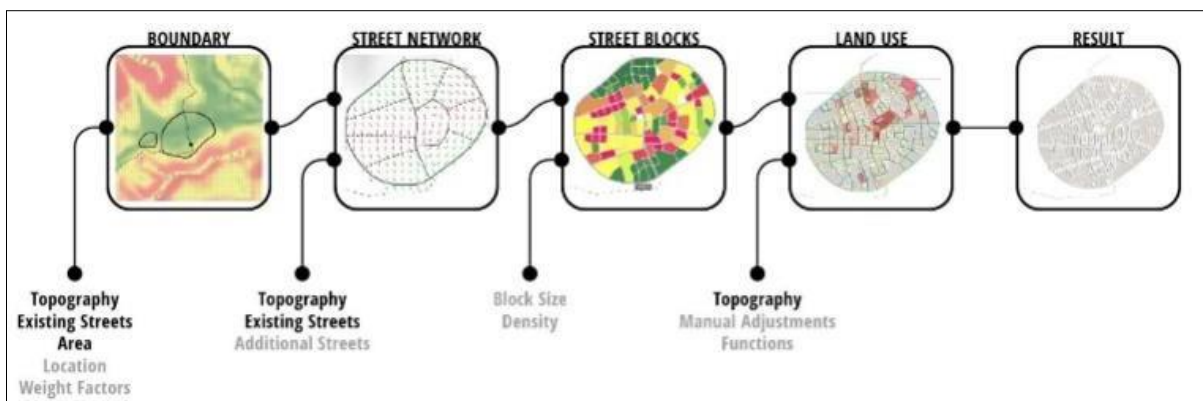


Fig III- 9 : Etapes du design urbain paramétrique (Source : O. Veselý, 2018)

III.2. Outils paramétriques du Microclimat

Sous Grasshopper on a besoin d'un component qui peut simuler le microclimat, Ladybug présente l'un des components les plus importants dans ce domaine. Actuellement, hormis Ladybug, il y a quatre outils d'analyse environnementale de Rhino/Grasshopper mis à la portée du public. Une comparaison des outils d'analyse environnementale existants sous Rhino/Grasshopper selon le type d'analyse qu'il fournit au cours des différentes étapes d'un processus de conception environnementale est résumée dans le (**Tab III- 1**). Comme illustré dans le tableau, aucun de ces quatre outils ne fournit un éventail complet des études environnementales, et il n'y a presque aucun support pour l'analyse des données météorologiques (A. Mostapha Sadeghipour Roudsari, Michelle Pak, Smith et al., 2013).

L'existence de plusieurs components sous grasshopper plusieurs components sous Grass Hopper pour accomplir les mêmes tâches, nous amène à effectuer une comparaison pour pouvoir faire le bon choix de l'outil que nous allons utiliser.

Tab III- 1 : Comparaison des outils d'analyse environnementale sous Rhino/Grasshopper (source : Roudsari, 2013)

Processus		Outils d'analyse				
		Ladybug	Heliothrope	Geco	Gerilla	Diva pour Rhino
Analyse climatique	Analyse	X				
	Visualisation	X	X**			
Plan de masse/ étude d'orientation		X		X		X
Etude de l'éclairage		X		X		X
Modélisation de l'énergie		X			X	X*

* Limité à une seule zone thermique.

** Diagramme solaire journal seulement.

III.2.1. Ladybug:

En 2018, Elwy I. et al., ont conclu dans leur étude que l'utilisation de l'outil Ladybug (Fig III- 10) intégré au logiciel Grasshopper a pour but la simulation du confort thermique et surtout le calcul du Physiological Equivalent Temperature (PET). Ceci a abouti à de bons résultats sur le plan de la précision et surtout en temps nécessaire pour faire les calculs par l'ordinateur.

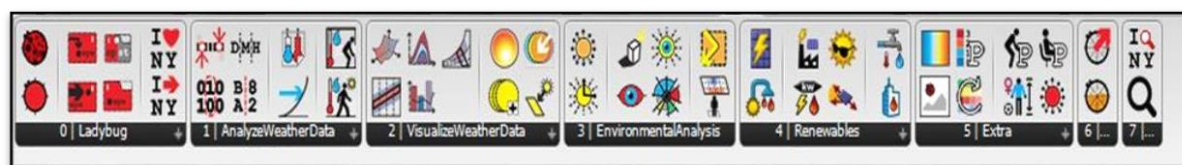


Fig III- 10 : : l'interface de Ladybug (source : auteur)

En 2013, M. S. Roudsari & M. Pak, présentent ladybug comme suit : Le plug-in Ladybug offre plusieurs avantages qui ne sont pas actuellement offerts par les plug-ins qui existent sous Rhino/Grasshopper et qui sont liés à la conception environnementale. Ladybug importe les fichiers standards de météo (.EPW) d'EnergyPlus dans Grasshopper

et offre une variété de graphes interactifs en 2D et en 3D qui peuvent aider le concepteur dans ses décisions environnementales pendant le processus des étapes initiales de la conception. Il simplifie également le processus d'analyse, automatise et accélère les calculs, et fournit des visualisations graphiques faciles à comprendre dans l'interface de modélisation 3D de Rhino/Grasshopper. Il permet également aux utilisateurs de travailler avec des moteurs validés, de simulation d'énergie et de l'éclairage naturel, tels que : EnergyPlus, Radiance et Daysim. L'intégration avec les outils paramétriques de Grasshopper permet d'obtenir des résultats instantanés après chaque modification de conception, et puisqu'il est intégré dans l'environnement de conception, l'information et l'analyse sont obtenues interactivement (**Fig III- 11**). Cet outil est gratuit et open source (les utilisateurs peuvent personnaliser l'outil en fonction de leurs besoins et contribuer au code source).

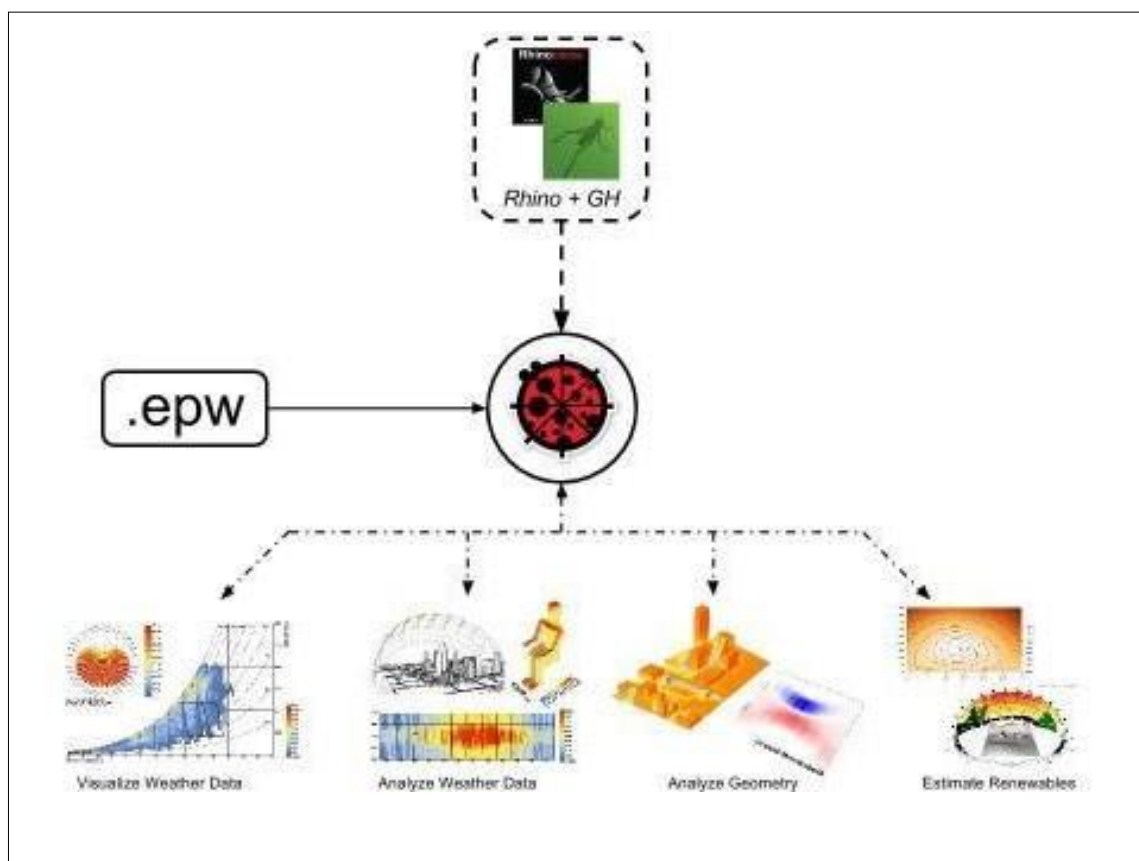


Fig III- 11 : Flux d'informations dans le plugin Ladybug (inputs et outputs) (source : <https://www.food4rhino.com/app/ladybug-tools>)

Ladybug est représenté comme un support pour effectuer l'analyse environnementale en une seule plateforme paramétrique. Il crée des visualisations 2D et 3D des données météorologiques pour appuyer le processus de prise de décisions pendant les premières

étapes de la conception, et les composants évaluent les options initiales de la conception par rapport à l'implication des résultats de l'analyse du rayonnement solaire et les heures de lumière solaire. Il prend en charge également la modélisation de l'énergie et de l'éclairage naturel à l'aide des moteurs de simulation validés tels qu'EnergyPlus (US Department of Energy), RADIANCE (Ward, 2004), et DAYSIM (Reinhart et Walkenhorst, 2001).

III.2.2. Méthode de calcul de (UTCI) dans LADYBUG

Le calcul de (UTCI) est fait à l'aide du plugin LADYBUG. Avec un component dédié pour cette tâche (**Fig III- 12**).

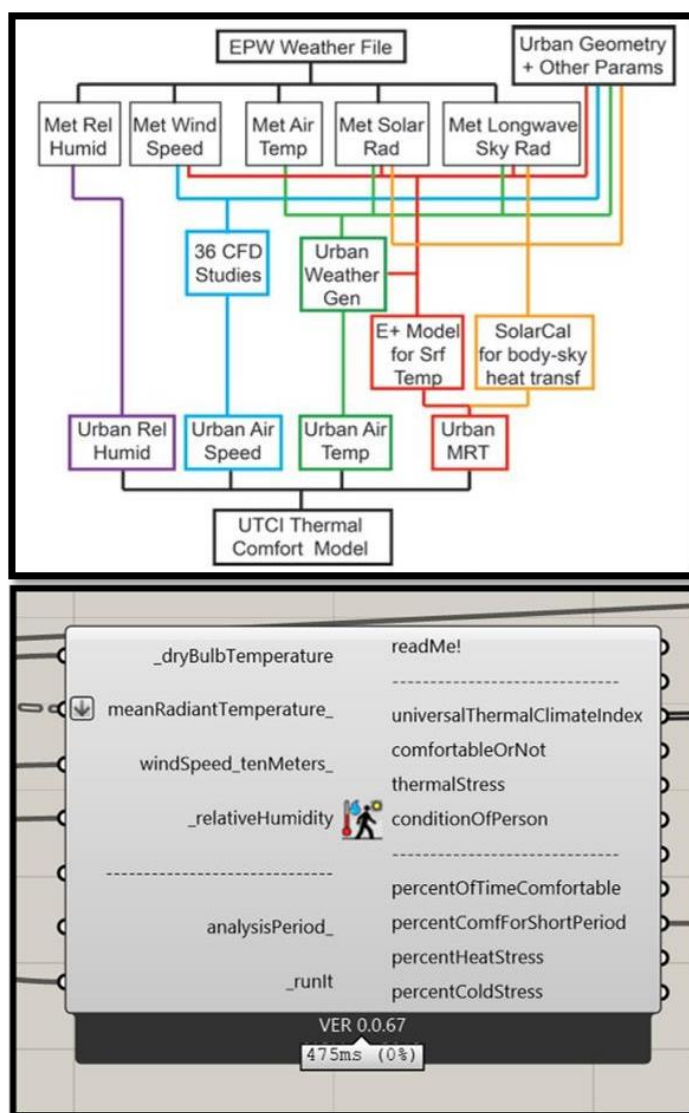


Fig III- 12 : Une charte qui illustre le flux et la relation entre les différents input et moteurs de simulation et le component de calcul de l'UTCI (source : Mackey C. et al., 2017)

III.3. Optimisation de la performance : résolution des problèmes par évolution

L'optimisation automatique selon des buts prédéfinis du design est un atout du design paramétrique qui va nous aider à trouver de nouvelles solutions à la forme urbaine et arriver à un compromis basé sur la performance énergétique, visuelle ou même sociale de l'espace.

III.3.1. GENE_ARCH

Selon Caldas en 2008, Le système de design génératif GENE_ARCH façonne la forme architecturale par l'adaptation. Dans l'exemple (**Fig III- 13**) les solutions générées pour une configuration d'un immeuble avec deux buts différents : l'éclairage naturel et le chauffage. Le système génère les solutions et les évalue pour les deux buts et propose des formes alternatives avec un compromis entre eux. L'architecte aura le choix puisqu'il y a d'autres paramètres à prendre en considération.

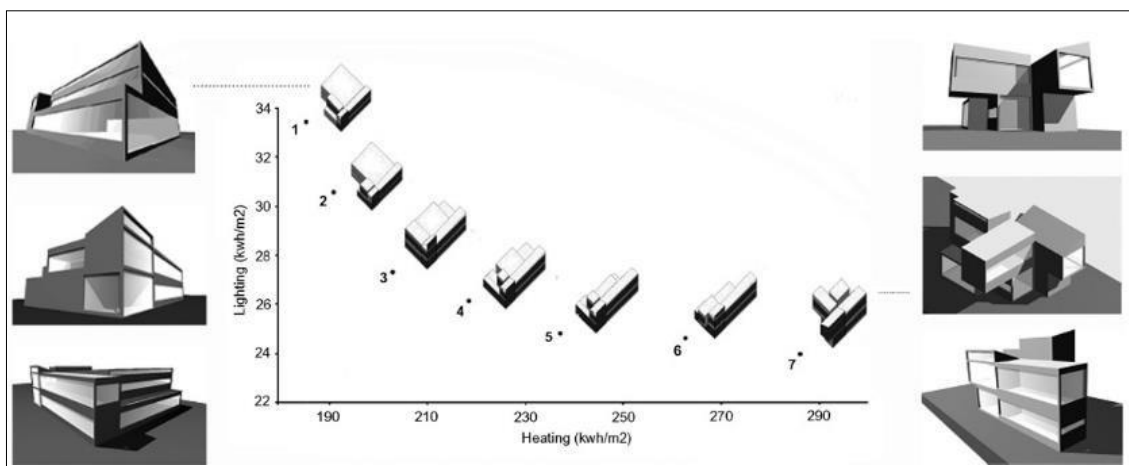


Fig III- 13 : Les composantes de GENE_ARCH (Source : L. Caldas, 2008)

III.3.2. Galapagos

Il s'agit d'un « component » d'optimisation évolutionnaire, développé sous le plugin Grasshopper et qui fonctionne comme un moteur de recherche de la meilleure solution pour un problème spatiale à partir d'une multitude de paramètres et de contraintes. Nous pouvons expliquer son fonctionnement avec une analogie de recherche du sommet dans un étendue de terrain (**Fig III- 14**).

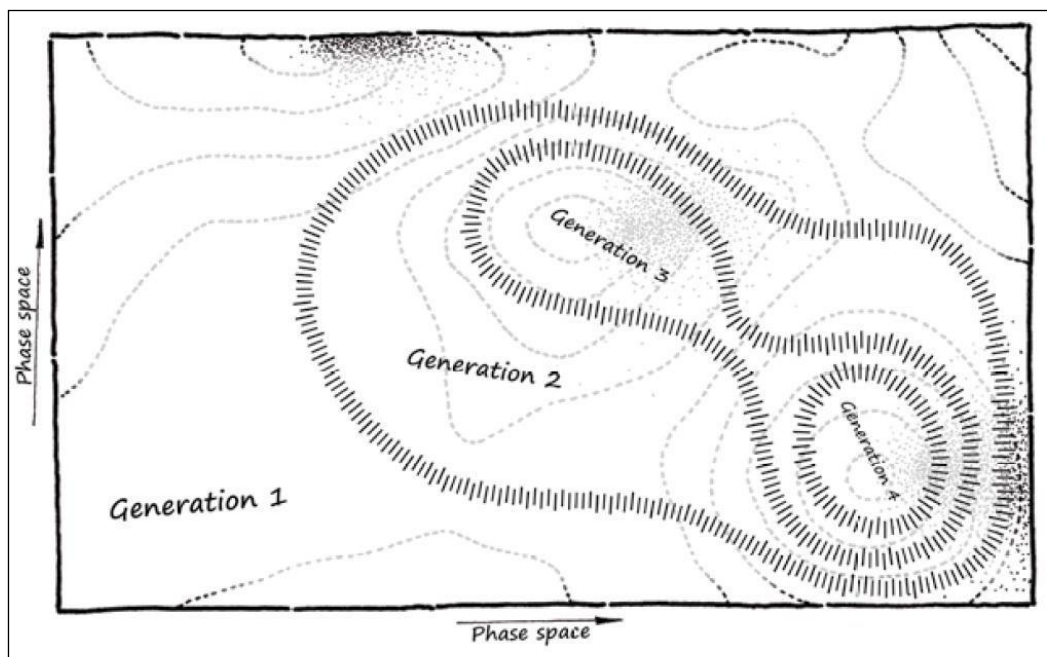


Fig III- 14 : Différentes générations de recherche du sommet ((D. Rutten, 2013)

Cette optimisation est faite par rapport à un but précis dans notre exemple c'est le sommet. Basé sur les principes de mutation sélection et trouvé dans la biologie. L'algorithme commence par la population de la surface par des individus virtuel et procède à la reproduction entre les meilleurs (les plus haut alors proche du sommet) jusqu'à s'approcher du sommet dans chaque nouvelle génération. Un exemple dans l'architecture dans la (Fig III- 15) et le rayonnement comme but, le modèle illustre la meilleure solution et la plus mauvaise.

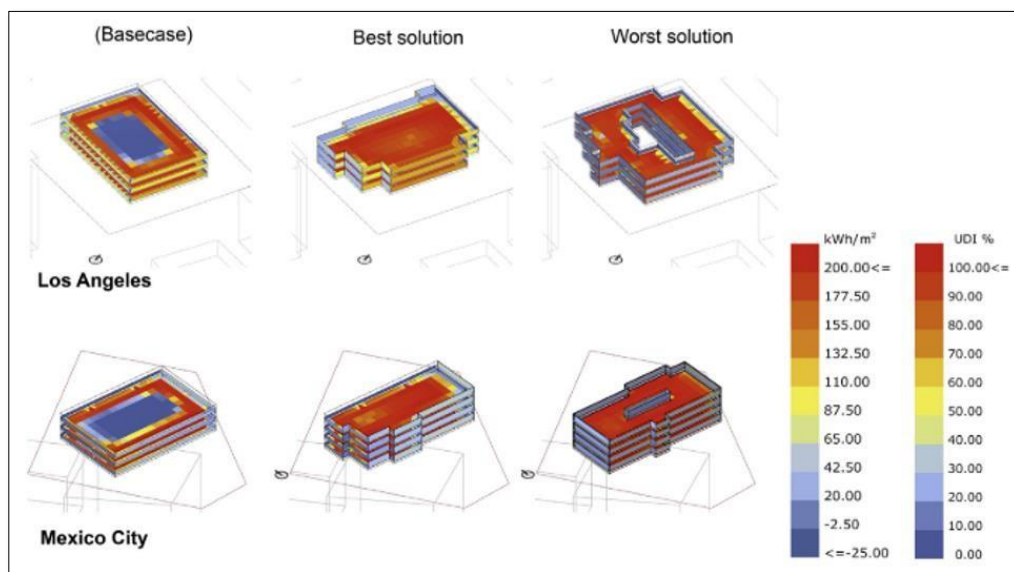


Fig III- 15 : exemple d'optimisation selon le rayonnement (Source : K. Konis et al., 2016), éditée

III.3.3. Wallacei

Une nouvelle plateforme plus complète par rapport à Galapagos. Il s'agit d'un outil de d'optimisation évolutionnaire et multi-objective doté d'un moteur d'analyse de données, comme illustré en (Fig III- 16) et (Fig III- 17).

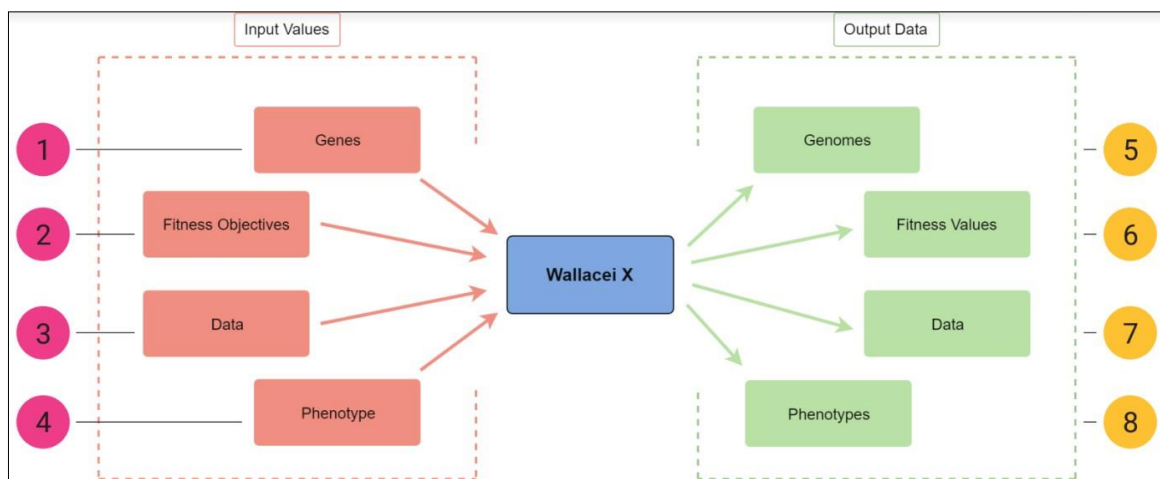


Fig III- 16 : Liste des Input et Output de Wallacei (Source : <https://www.wallacei.com/learn> consulté le: 29/02/2020)

Fitness Criteria		Genes				
Fitness Criteria		Number of Courtyard	Courtyard Location	Area of Courtyard	Access Location	Building Height
Maximise Number of Courtyard	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Minimise Shaded Area in Courtyard	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Maximise Building Volume	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Minimise Path Distance	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Gene _ 49

Fig III- 17 : Interface de Wallacei Avec un exemple de cas d'étude (Source : <https://www.wallacei.com/chinese-university-of-hongkong> consulté le: 29/02/2020)

Conclusion

Dans ce chapitre d'ordre explicite, nous avons inventorié tous les outils paramétriques disponibles adoptés au fil des années. Par la suite, l'exploration, la comparaison et l'évaluation de ces logiciels et plug-ins, nous ont permis de les identifier et de mieux cerner leur cadre d'application dans le but de sélectionner ceux qui conviendraient pour notre recherche.

Notre choix a donc porté sur le logiciel grasshopper et son plug-in Ladybug pour les raisons suivantes :

- Grasshopper, langage de programmation visuel, a une interface graphique qui facilite la tâche et ne demande pas à l'utilisateur d'être bien versé dans le domaine de la programmation.
- Ladybug, collection d'applications prenant en charge la conception environnementale, contient un component qui sert à modeler le « UTCI » et peut l'afficher dans l'espace simulé sur une grille colorées représentative des différents niveaux de confort.

Chapitre IV

Apports et limites du Design Paramétrique

Essais d'application

Introduction

Après avoir exploré dans le chapitre précédent les différents logiciels et l'importance d'évaluer l'impact de la morphologie urbaine sur le confort extérieur, nous allons interroger, dans ce chapitre, les hypothèses émises par le biais d'une multitude d'essais et de tester différentes configurations urbaines. Dans le but de valider nos hypothèses, nous avons opté pour un prototype : une ville à climat semi-aride, en l'occurrence la ville de Bou Saâda, celle-ci est dotée d'une variété de tissus urbains. L'objectif bien sûr ne consiste pas à améliorer l'existant ; puisque la géométrie, la volumétrie, l'implantation et l'orientation sont imposées par le tissu existant ; mais plutôt explorer les atouts qu'on pourrait gagner dans les nouveaux projets, si on anticipe par l'intervention dans la phase de l'avant-projet. Le concepteur peut, à l'aide des outils proposés être informé sur la qualité et les conditions du confort thermique extérieur en milieu urbain en suivant plusieurs étapes. Par la suite, nous allons tester un tissu existant et établir une comparaison avec un nouveau tissu juxtaposé au tissu existant et soumis aux mêmes conditions.

IV.1. Démarche et outils d'investigation

Grace aux outils disponibles dans Grasshopper, on va importer la géométrie et la morphologie urbaine existante dans le site choisi en sachant que ce quartier a été conçu sans tenir compte du microclimat. Ensuite, on opte pour un terrain vierge pour faire notre intervention. L'étape suivante sera de générer une géométrie, découlant de plusieurs essais et approches, puis l'évaluation de l'écart « entre les bâtiments ». Pour cela on doit d'abord simuler l'effet du microclimat sur le confort, ce qui implique de prendre en considération les indices de confort. On va donc travailler avec un pourcentage indiquant le degré de confort, calculé par un ratio entre : les points confortables dans l'espace choisi, et le nombre total des points. Tout ceci dans le but de valoriser la conception de tissus urbains qui intègrent un rapport au climat.

IV.2. Premier essai de simulation

Dans cet essai, nous avons opéré sur le cas réel dans la ville avec un climat semi-aride.

IV.2.1. Diagnostic (état des lieux)

Avant toutes interventions, le concepteur, a besoin de construire un bref diagnostic de l'état des lieux, il doit surtout connaître la situation géographique, le climat et les données climatiques du lieu qui s'avèrent nécessaires.

IV.2.1.1. Choix du site

L'objectif de ce travail, est de tester une nouvelle agglomération dans les étapes de genèse du projet. Nous avons choisi un tissu urbain parmi les nouveaux récemment bâtis. Il est situé dans une ville à climat semi-aride (Fig. IV-1).

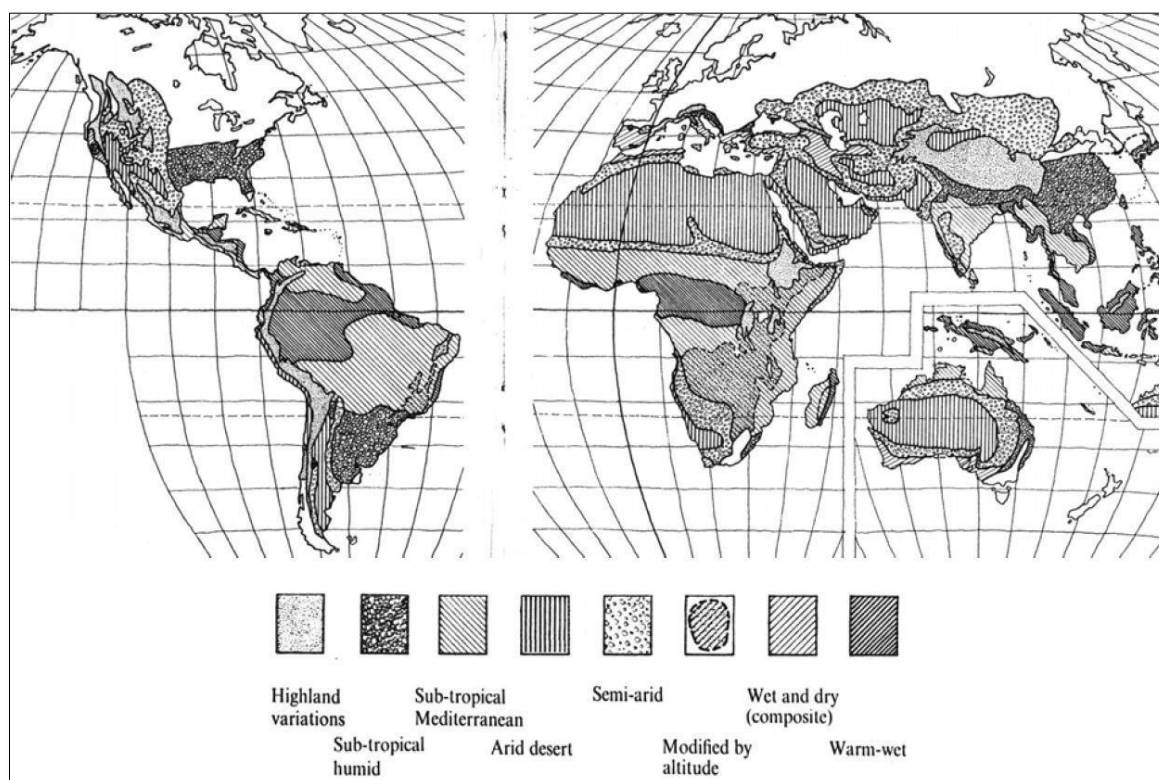


Fig. IV- 1 : Zones arides et semi arides dans le monde (Konya A., 1982 dans Ould-henia A., 2003)

Première oasis rencontrée lorsque l'on se dirige depuis Alger vers le sud algérien. La ville de Bou Saâda est située à 245 km au Sud d'Alger, la capitale de l'Algérie (Fig. IV-2). Selon Britannica, cette ville comporte un tissu colonial en plus du Ksar entouré par un mur au Sud. Du point de vue de ses potentialités touristiques, les écrivains qui ont visité la ville de Boussaâda, à partir du 18ème siècle, ont mis en évidence le potentiel que possédait la

ville. Mais selon A. Ould-henia en 2003, la ville contient un nouveau tissu qui s'allonge le long de la route nationale Djelfa qui est subdivisé en deux afin de recevoir deux types : le collectif et l'individuel.

Actuellement, la ville continue son extension encore dans la limite du temps et de l'espace. La région est montagneuse et en plus de l'Oued et l'oasis, ces obstacles physiques exigent une forme particulière de l'extension.

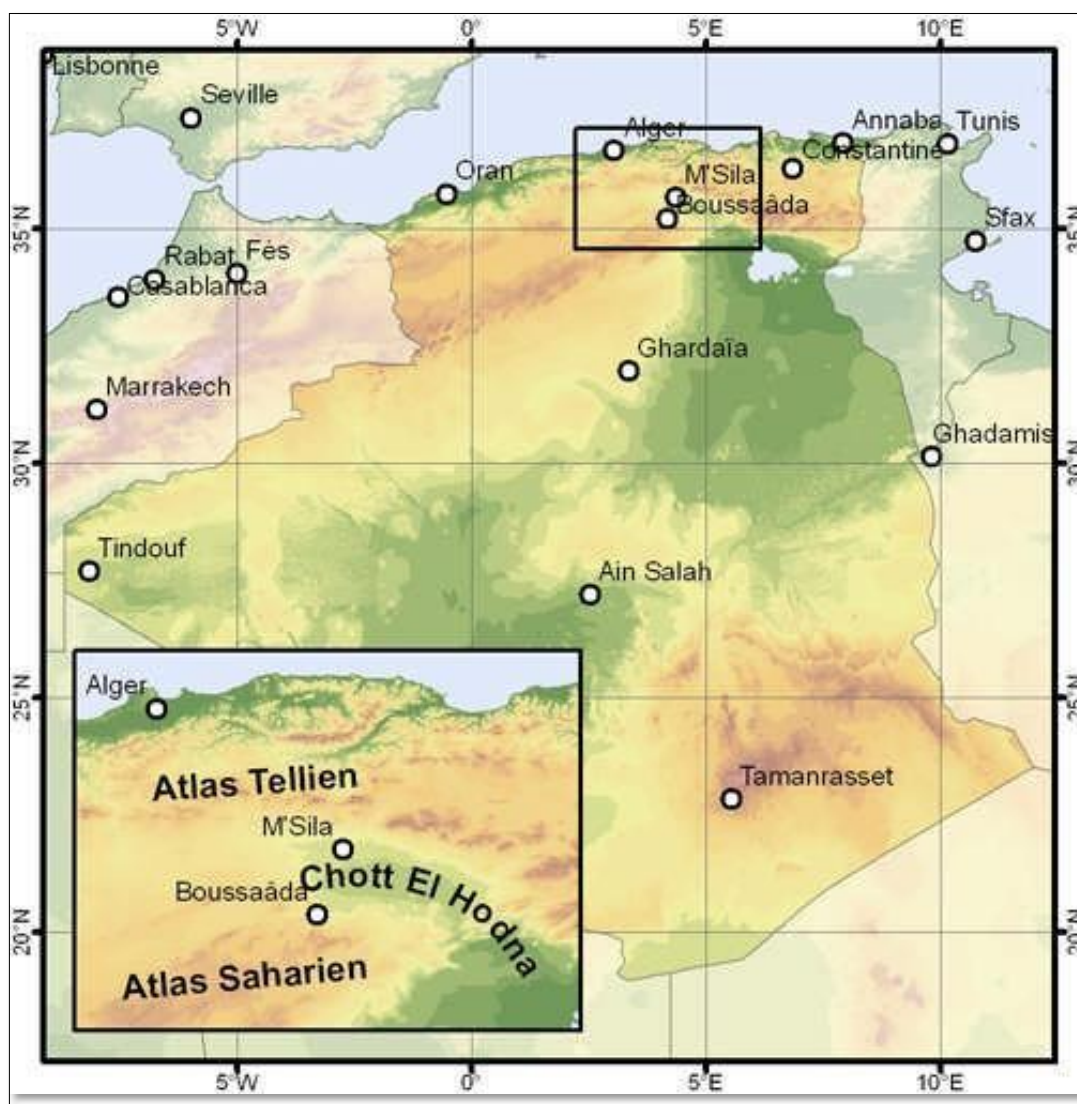


Fig. IV-2 : Situation géographique de la ville de Bou Saada (Source :M. M. Salmon et al., 2009)

IV.2.1.1.1. Situation du cas d'étude

Le site choisi se situe dans la cité Ben Dakmous au Nord de la ville de Bou Saada. Il s'agit d'une nouvelle agglomération (**Fig. IV- 3**)

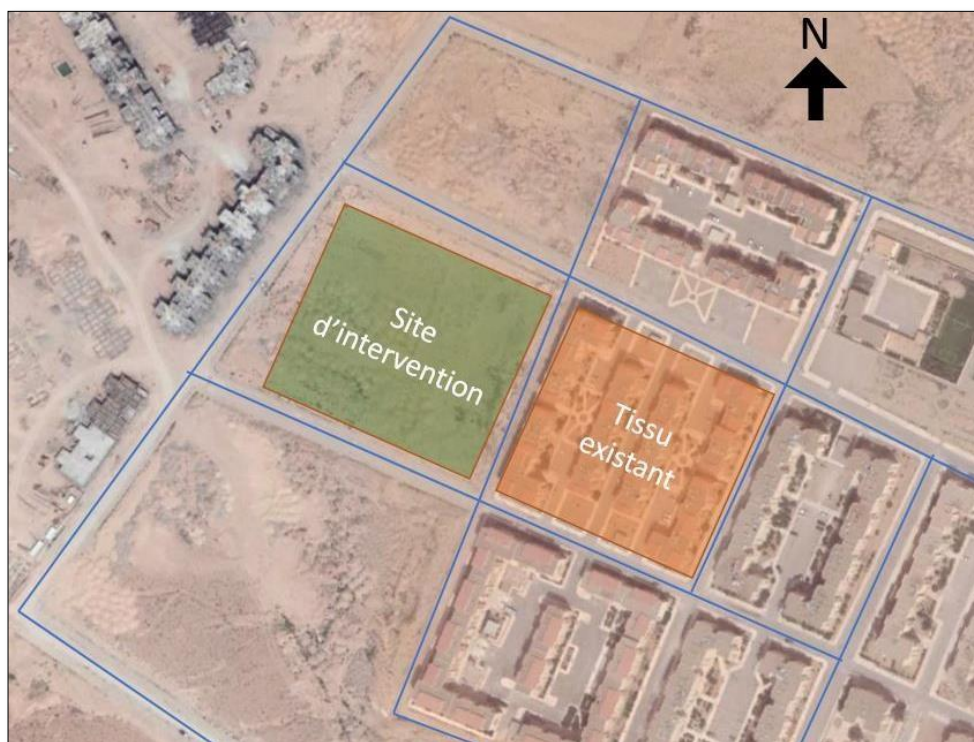


Fig. IV- 3 : Image Satellite illustrée (Source : Google Earth 2019)

IV.2.1.1.2. Présentation du tissu existant

Le tissu choisi consiste en 14 bâtiments d'une hauteur de (R+4) et (R+3) qui abritent 150 logements collectifs avec des espaces communs destinés aux stationnements de véhicules, à la circulation, aux aires de jeux ainsi qu'aux espaces verts (**Fig. IV-4**).



Fig. IV- 4 : Vues sur le tissu existant (Source : Auteur)

IV.2.1.1.3. Présentation du site d'intervention

Dans le côté Ouest du tissu existant, il y a un terrain vague (**Fig. IV- 5**) où nous pouvons simuler un nouveau tissu, soumis aux mêmes conditions climatiques et urbaines pour faire une comparaison avec le tissu existant (confort thermique et morphologie urbaine du tissu existant du tissu proposé).



Fig. IV- 5 : Photos du site d'intervention avec le tissu existant à droite (Source : Auteur)

IV.2.1.2. Données climatiques de Bou Saada

La ville de Bou Saada se trouve à la latitude 35° N et à une altitude de 550 m.

De par son étendue, le climat de l'Algérie est diversifié, ce qui lui donne trois régions climatiques distinctes (**Fig. IV-6**). Au Nord, le climat méditerranéen, marqué par des hivers doux et une longue période estivale, chaude et tempérée. La température oscille entre 5°C et 15°C l'hiver et entre 25°C à 35°C l'été. Dans les régions montagneuses (la chaîne nordique du Tell), les hautes cimes abritent la neige généralement de Décembre à Mars. Dans les hauts plateaux, un climat steppique, dit semi-aride faisant alterner de dures sécheresses et de fortes pluies (parfois de la neige), et est connu pour être une zone de passages des vents chauds du Sud vers le Nord, appelés siroccos. Quant aux régions sahariennes, à l'extrême Sud du pays, celles-ci sont dominées par un climat sec et très chaud, avec une amplitude de la température allant de 45°C à midi à 3°C la nuit (**voir annexe. 1**) pour plus de détails.

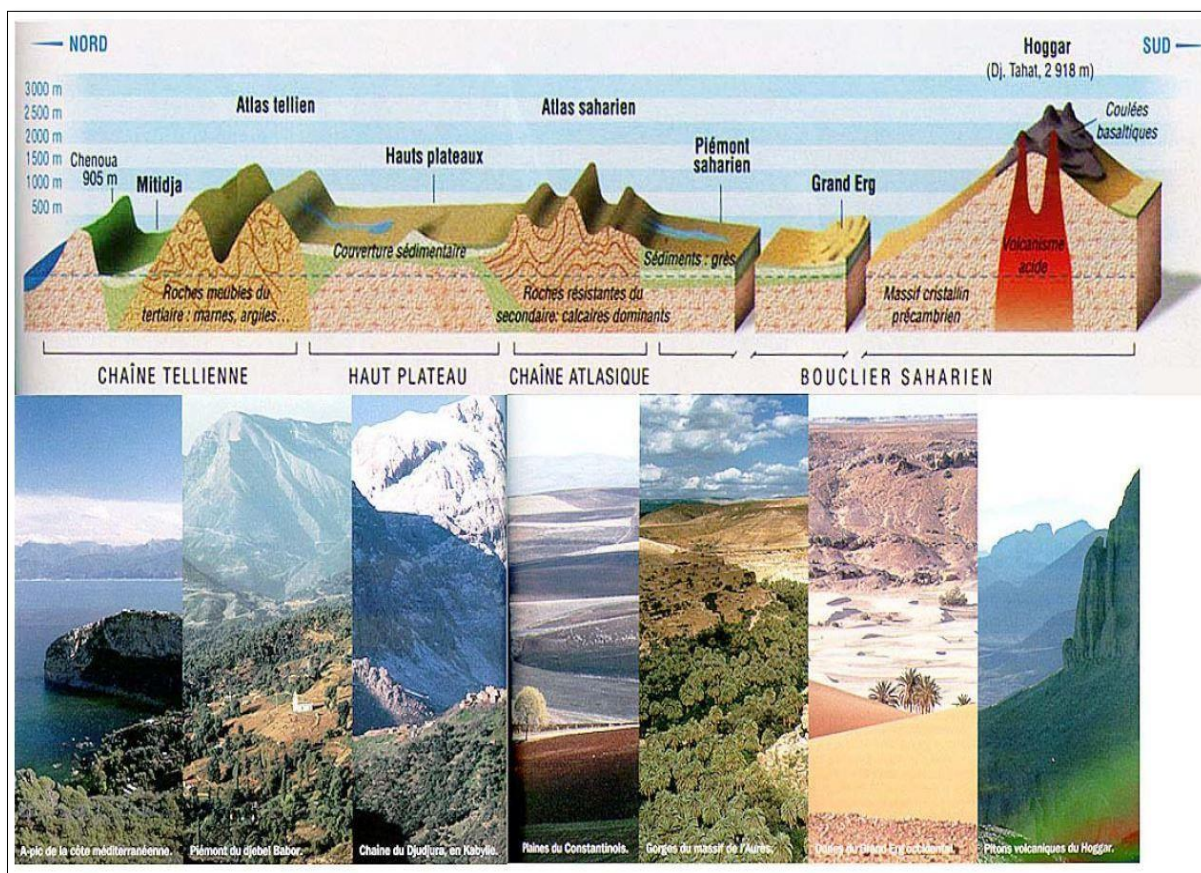


Fig. IV- 6 : Coupe transversale Nord – Sud du relief (Revue Geo dans Ould-henia A., 2003)

L'Algérie est le pays le plus large en Afrique. Il est caractérisé par trois types de climats majeurs :

- Le climat méditerranéen, le climat semi-aride et le climat saharien.

Justement, Bou Saâda se trouve dans la zone des steppes, elle est caractérisée par un climat semi-aride.

IV.2.1.3. Analyse bioclimatique

Située sur la latitude 35.33°N et 4.2 °E., à 461 m au-dessus de la mer, Bou Saada, en plus du climat semi-aride, elle est caractérisée aussi par un climat a des températures tempéré (Fig. IV-7).

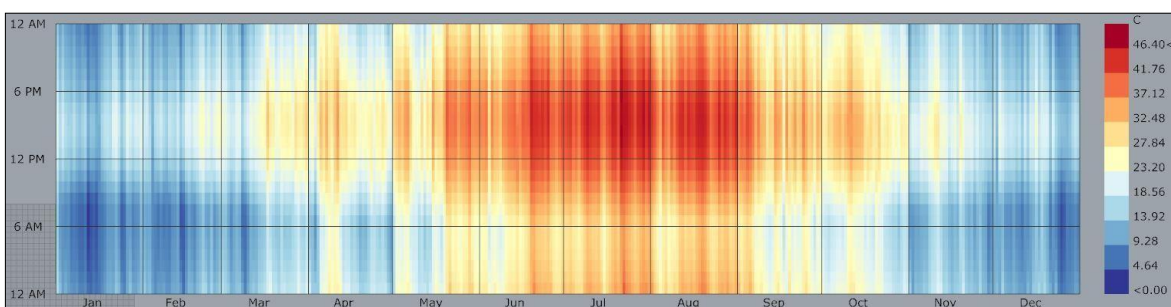


Fig. IV- 7 : Température de l'air, heure par heure, pendant une année.

IV.2.1.3.1. Choix de la période et paramètres de fitness

Il nous semble que les paramètres de fitness les plus importants sont : le nombre d'heures confortables et la limitation des températures extrêmes en particulier la chaleur aux moments des canicules.

A parti du fichier (.STAT) de la ville de Bou Saada, nous avons la possibilité d'extraire la semaine typique d'été (du 22 juin au 28 juin) et de l'hiver (du 8/12 au 14/12) (Fig. IV- 8).

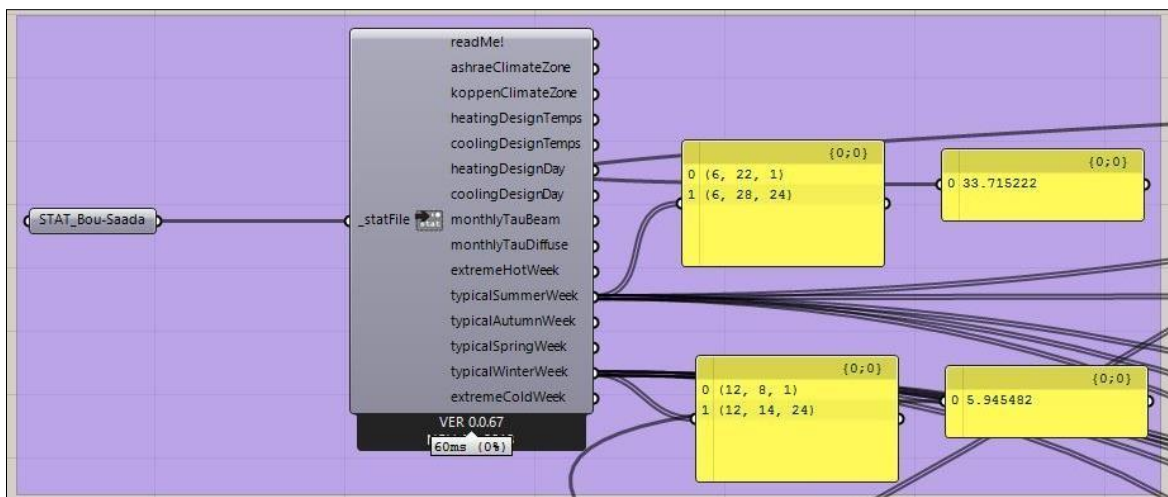


Fig. IV- 8 : calcul de la semaine typique de l'été et de l'hiver (Source : Auteur)

IV.2.1.4. Simulation de l'UTCI

La simulation a été faite pour calculer la distribution spatiale du confort thermique

dans les espaces extérieurs. Celle-ci révèle une moyenne de l'UTCI en été de l'ordre de 33.71 °C , la moyenne de l'UTCI en Hiver est de 5.94 °C (**Fig. IV-9**).

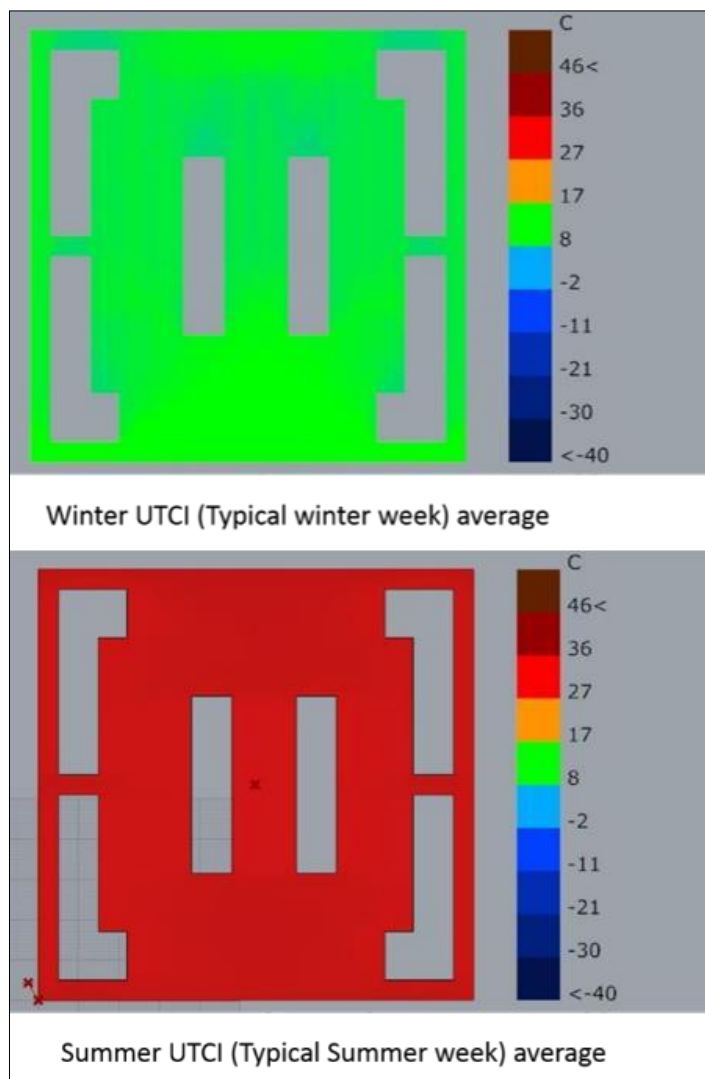


Fig. IV- 9 : Simulation et distribution spatiale de l'UTCI en hiver et en été (source : auteur)

IV.2.1.5. Proposition d'un tissu nouveau

Dans le site d'intervention, nous avons tenté de faire une conception d'un tissu urbain à l'aide de l'algorithme testé dans le deuxième essai. Après l'optimisation, le nouveau tissu a une moyenne de rayonnement solaire dans les espaces extérieurs de 343.83 kWh/m² (**Fig. IV-10**). La différence entre la nouvelle configuration et celle de l'ancien tissu vis-à-vis de l'intensité du rayonnement solaire est illustrée par la figure (**Fig. IV- 11**).

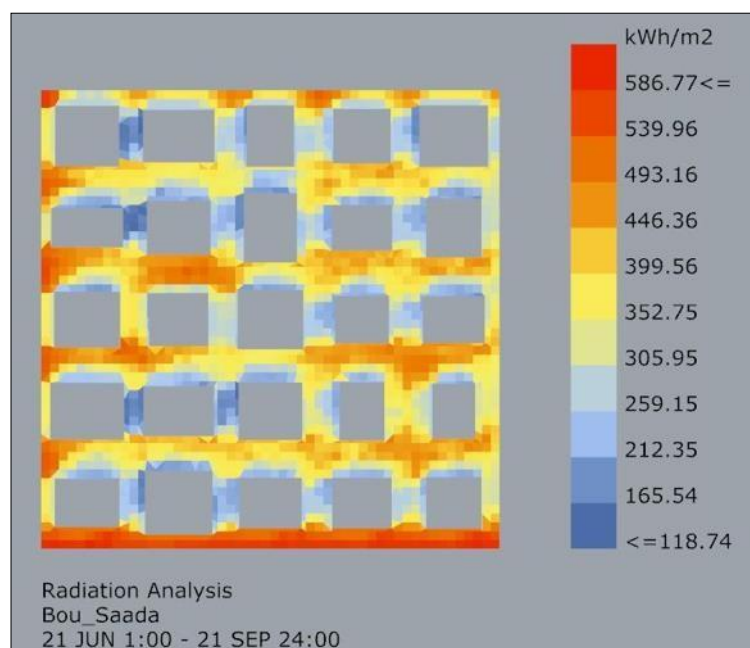


Fig. IV- 10 : Distribution spatiale du rayonnement solaire dans l'espace extérieur (source : auteur)

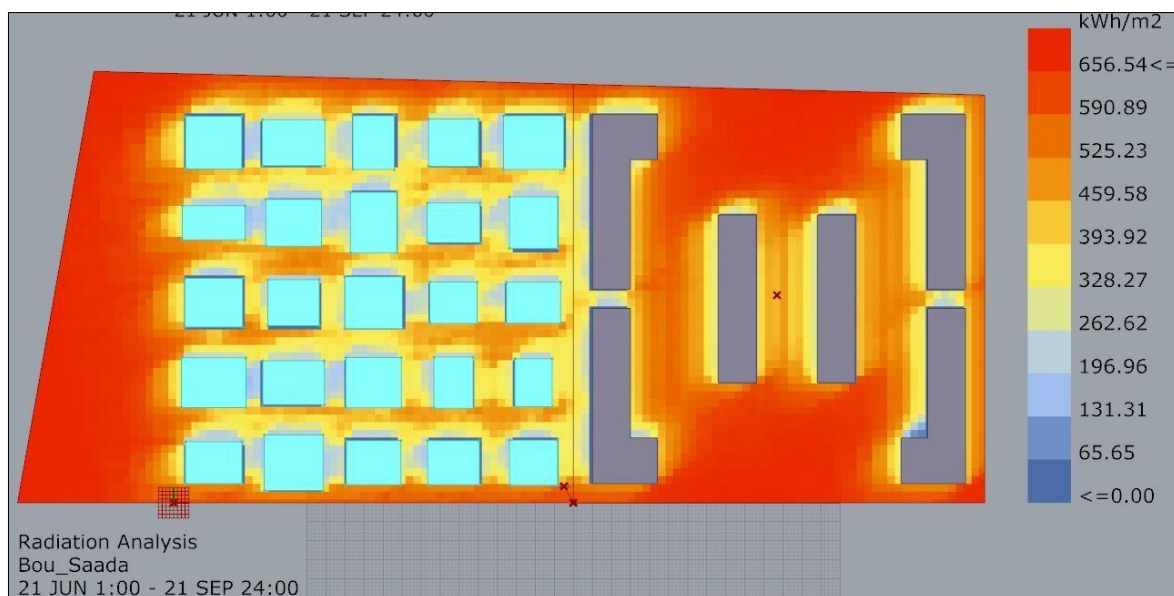


Fig. IV- 11 : Comparaison entre l'intensité du rayonnement solaire entre le tissu existant et le tissuancien (source : auteur)

IV.2.1.6. Vérification du confort thermique par l'UTCI

Suite à la modélisation de la configuration urbaine du nouveau tissu, nous avons trouvé que la moyenne du confort thermique extérieur est de 33,48 °C pendant la semaine typique

d'été (**Fig. IV-12**) et de 4.84 °C pendant la semaine typique d'hiver. La Distribution spatiale de l'UTCI à l'extérieure à une hauteur de 1,5m du son est illustrée (**Fig. IV- 13**).

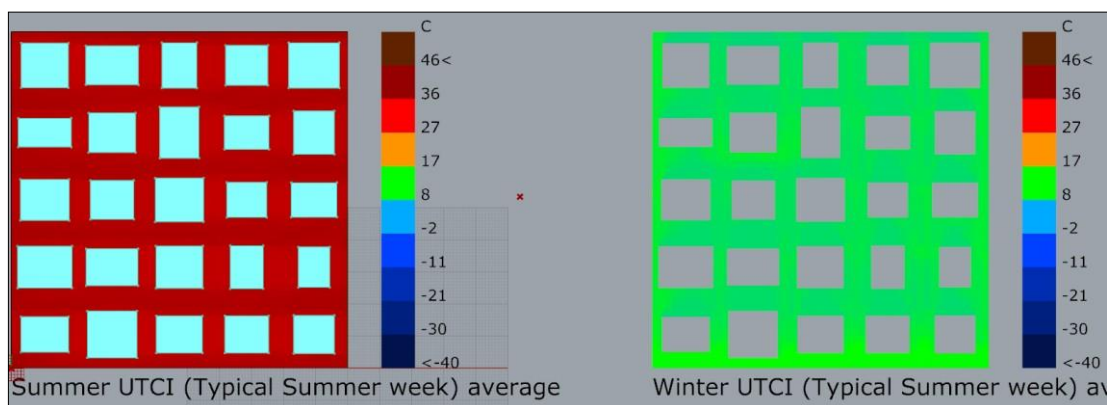


Fig. IV- 12: Confort thermique dans la nouvelle configuration (source : Auteur)

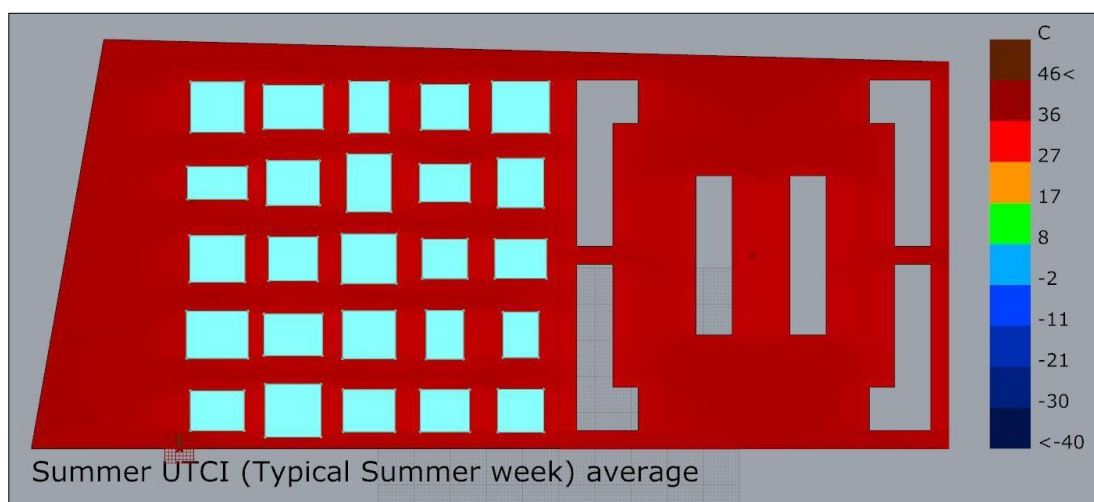


Fig. IV- 13: Distribution spatiale de l'UTCI à l'extérieure à une hauteur de 1,5m (Source : Auteur)

IV.3. Deuxième essai de simulation

Nous allons opérer notre champ d'application sur un cas d'étude réel. Nous avons opté pour un essai théorique dans une grille régulière.

IV.3.1. Méthode

Pour cet essai nous allons faire une configuration simple, dans le but de voir le niveau de difficulté pour la création d'un algorithme ayant la capacité de générer la géométrie d'une façon automatique. Par la suite, nous allons la tester et la modifier jusqu'à arriver à un Fitness Goal bien précis (**Fig. IV-14**).

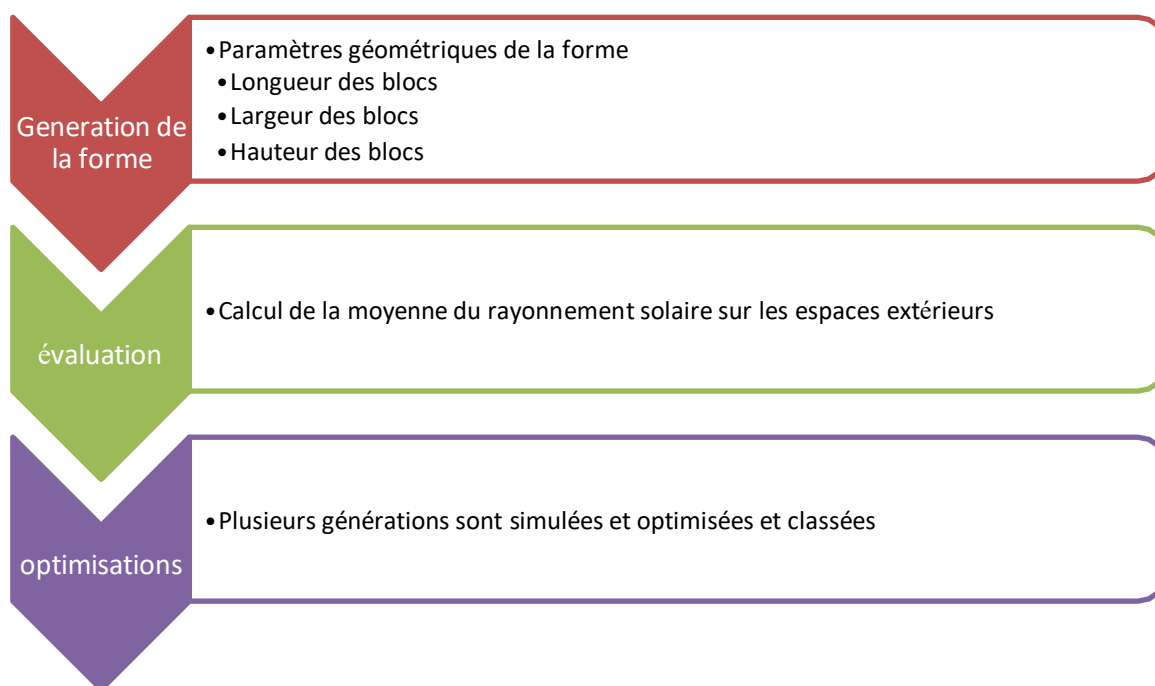


Fig. IV- 14 : Diagramme des étapes de l'essai (Source : auteur)

La configuration choisie comporte 9 volumes qui représentent les bâtiments en plus d'un terrain. La grille d'analyse est à 1.5 m du niveau du sol. Rappelant que le site choisi est dans la ville de Bou Saâda et la période choisie est la saison estivale. Différentes configurations urbaines seront générées à l'aide de l'algorithme que nous avons établi. Le component Galapagos va générer 50 différentes configurations pour chaque génération. Il va choisir les dix premières générations qui obtiennent le meilleur score dans la Fitness. Après cela, pour chaque nouvelle génération il va coupler les dix meilleures de la génération précédente pour obtenir les 50 nouvelles configurations. Ainsi, il va continuer jusqu'à l'arrêt par l'utilisateur ou s'il atteint l'objectif (Fitness) précisé dans le début de l'essai (**Fig. IV- 15**).

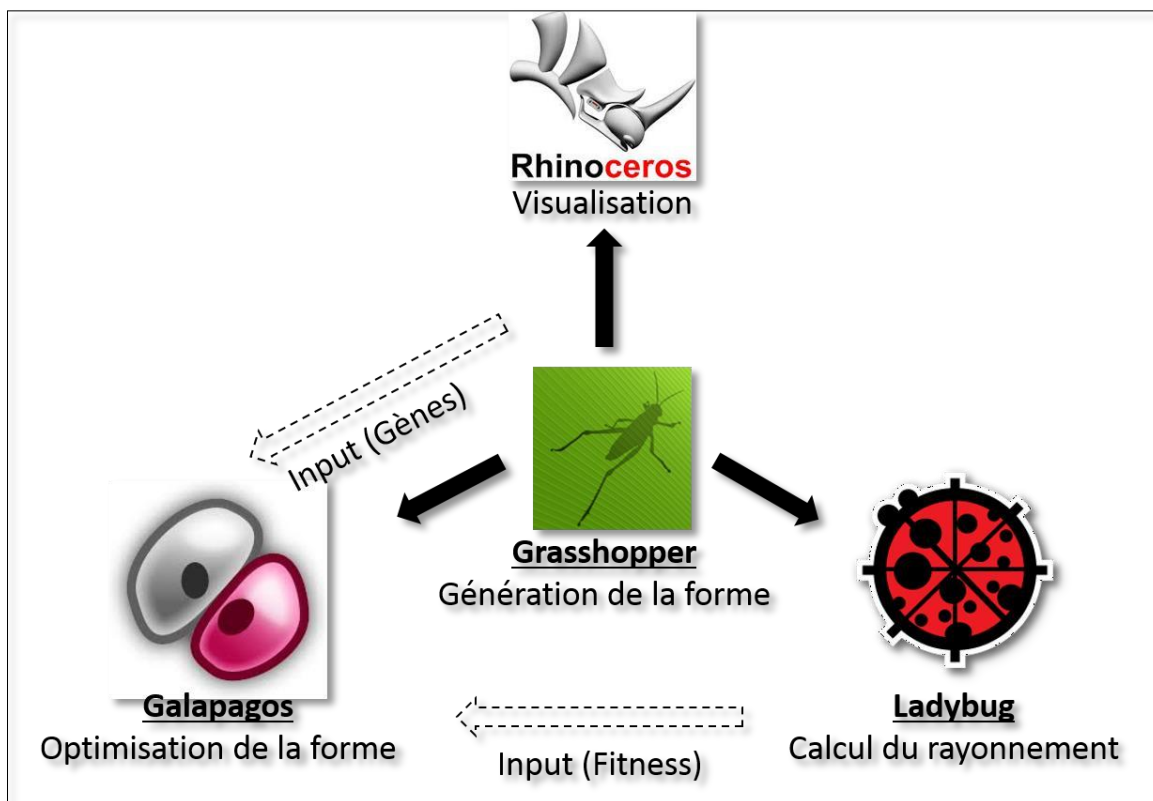


Fig. IV- 15 : Relations entre les différents outils (Source : Auteur)

En démarrant l'essai, tous les paramètres sont mis à zéro (Fig. IV-16). Au départ, nous ajustons la simulation, ensuite nous effectuons la configuration du component Galapagos pour lancer le calcul. C'est ainsi que nous aboutissons à la meilleure configuration urbaine.

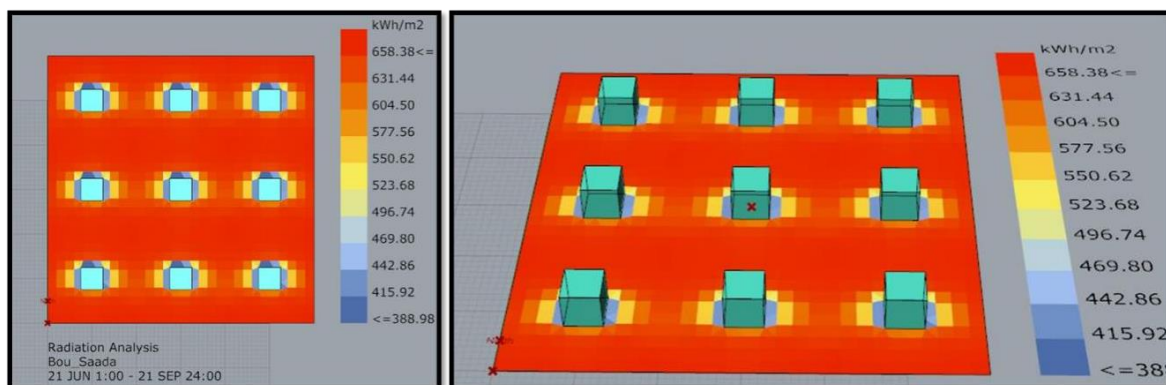


Fig. IV- 16 : Vue tridimensionnelle de la configuration urbaine L'état initial de l'essai (Source : Auteur)

IV.3.1.1. Génération de la forme

Pour cette raison, nous avons opté pour un algorithme modulaire (voir annexe). Chaque module accomplit une tâche spécifique (**Fig. IV-17**).

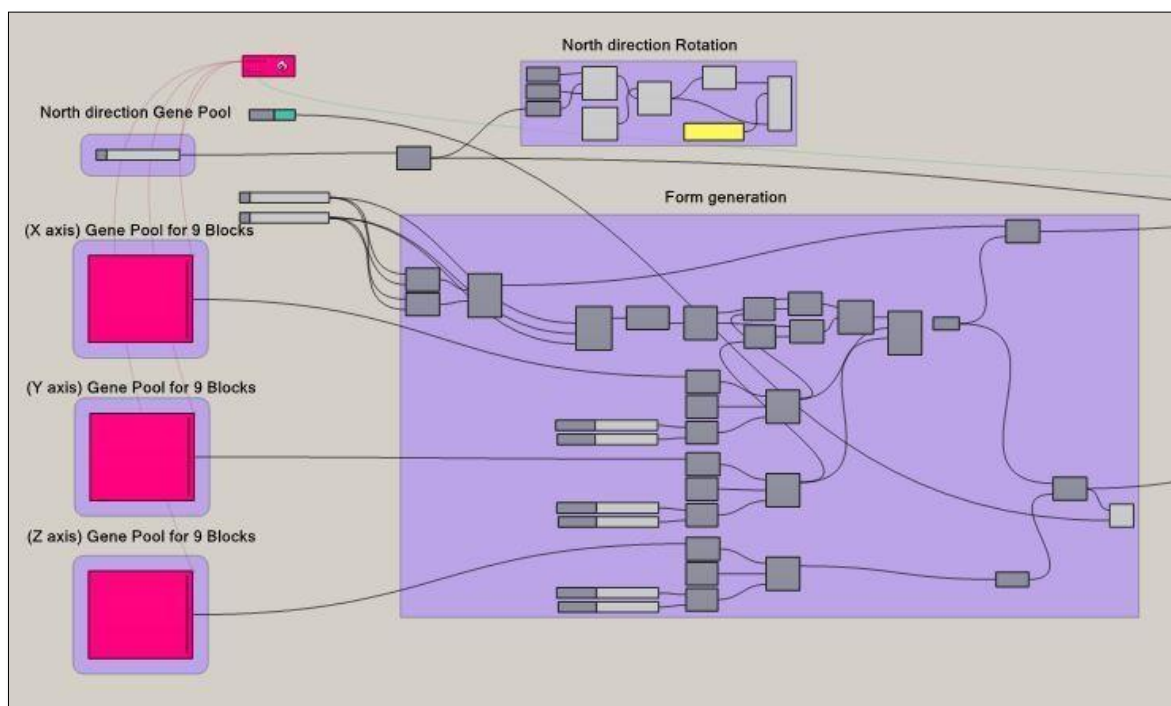


Fig. IV- 17: Vue partielle de l'algorithme utilisé pour la génération de la forme et les gènes de la géométrie urbaine (Source : Auteur)

- **Module 01 : Création d'une grille régulière**

Afin d'obtenir une forme paramétrique, il est nécessaire de préparer un algorithme qui puisse générer cette forme d'une façon paramétrique (**Fig. IV-18**).

Les paramètres dont il s'agit sont les suivants :

- Largeur du bloc
- Longueur du bloc
- Hauteur du bloc
- Orientation (représentée par la direction du Nord)

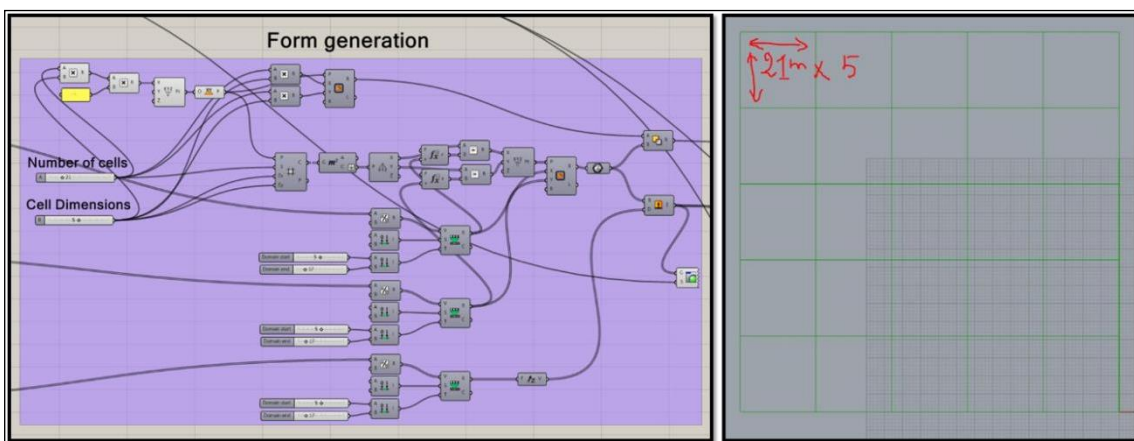


Fig. IV- 18 : Algorithme de la génération d'une grille régulière.

IV.3.2. Optimisation de la morphologie

La recherche de la forme optimale d'une façon paramétrique s'est effectuée à l'aide du plugin Galapagos. Cette recherche est faite d'une manière évolutionnaire (Fig. IV- 19). Ce plugin demande des inputs (les gènes et le paramètre de fitness). Après, nous procédons à l'ouverture de l'interface et changer le but à (Minimiser). Par la suite, nous lançons l'optimisation pour obtenir une liste des meilleurs résultats.

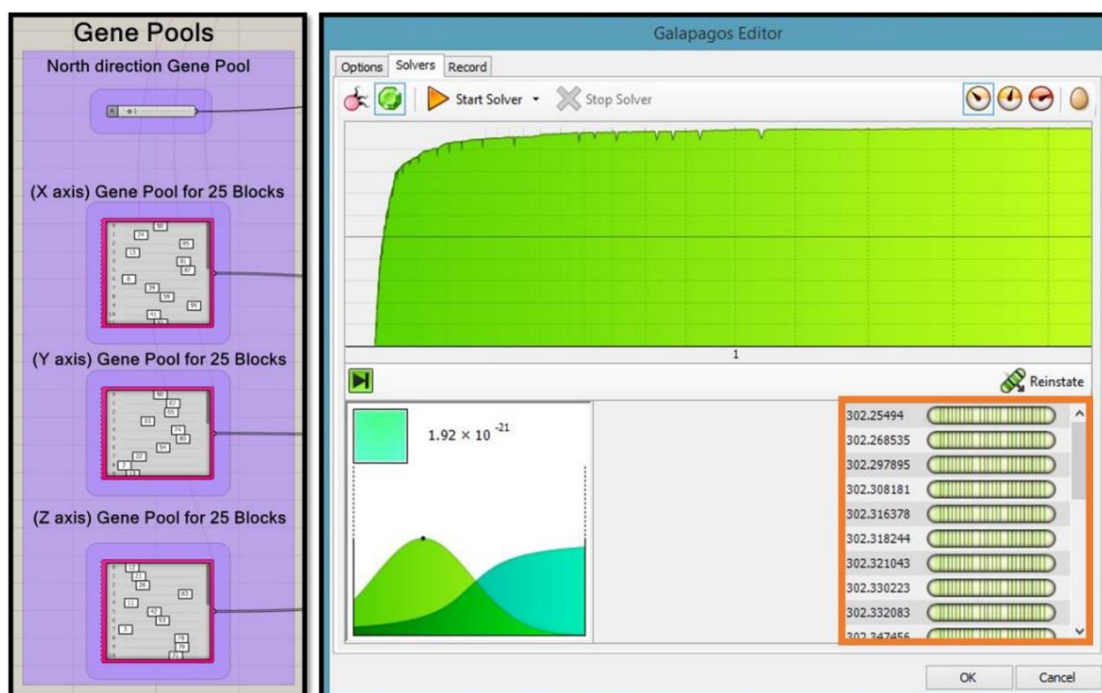


Fig. IV- 19 : Graphe de la progression de solutions générées et l'amélioration graduelle de Fitness (Source : Auteur)

IV.3.3. Fitness et rayonnement solaire

Vers la fin de l'optimisation on peut obtenir la meilleure configuration et on peut la visualiser en trois dimensions (Fig. IV- 20)

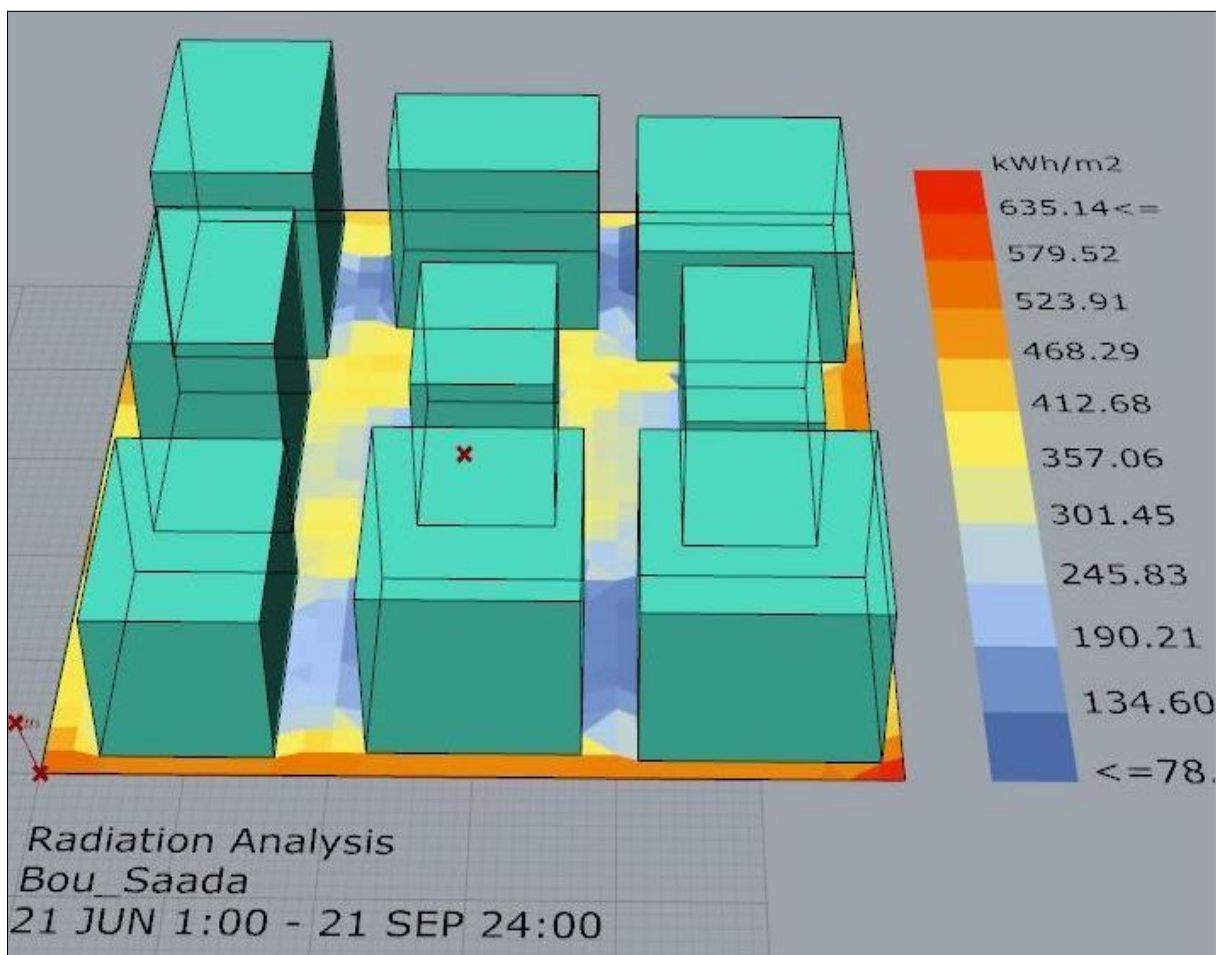


Fig. IV- 20 : Configuration finale obtenue après le processus de l'optimisation évolutionnaire

IV.4. Résultats et discussion

IV.4.1. Premier essai

Une application d'essai sur un cas réel existant se trouvant dans la ville de Bou Saâda. De ce fait, la simulation de l'UTCI démontre que le confort thermique est amélioré légèrement dans le nouveau tissu en comparaison avec le tissu ancien 33,48 °C et 33,71 respectivement, cette amélioration est négligeable.

Ce qui nous amène à supposer que la solution réside dans la présence de la végétation, qui pourrait notamment impliquer une amélioration du confort thermique extérieur et avoir plus d'effet sur les résultats. En plus de cela, la simulation a été faite pour toute la journée, la différence pourrait être plus visible si nous avions testé seulement la période la plus ensoleillée de la journée estimée être entre 10h00 du matin et 16h00 de l'après-midi, bien qu'elle ne soit pas testée dans notre recherche. Ainsi que le calcul n'ayant pas considéré la quantité de chaleur capturée par les parois, ce qui pourrait changer les résultats de cette simulation.

Le développement d'un outil de conception qui va nous permettre d'évaluer le confort thermique extérieur par des paramètres prédéfinis, peut expliquer le besoin de relier plusieurs paramètres dans la conception du projet.

Cet outil est le vrai effort dans notre recherche, c'est plutôt l'outil qui est le sujet d'amélioration et pas le confort. Sous cette lumière, nous constatons par ce travail que nous pouvons avoir de meilleurs résultats par l'amélioration de l'outil

Par ailleurs, selon F. Lindberg & C. S. B. Grimmond, 2011 cité par C. Chatzipoulka et al., en 2015, la corrélation entre la morphologie urbaine et le confort thermique dépend de la latitude. Le soleil pendant la période estivale est le plus haut dans le dôme céleste, cela diminue l'effet de l'ombre généré par les bâtiments à cause de leur caractère vertical.

A cet effet nous concluons que l'occultation horizontale (canopée naturelle verte ou artificielle) est plus efficace quand il s'agit du confort thermique en été et la diminution de l'effet du rayonnement solaire, ce qui explique les résultats obtenus peu conséquents sur l'amélioration du confort thermique en été.

Par contre, en saison hivernale pendant la semaine typique choisie, la différence entre la température du nouveau tissu en comparaison avec le tissu ancien (4.84 °C et 5.94°C) respectivement est plus significative. Cela est dû à la hauteur du soleil pendant la saison d'hiver qui est plus basse.

Un facteur très important, l'orientation, a été imposée par le site d'intervention pour garder la même que celle du tissu existant (**Fig. IV- 21**).

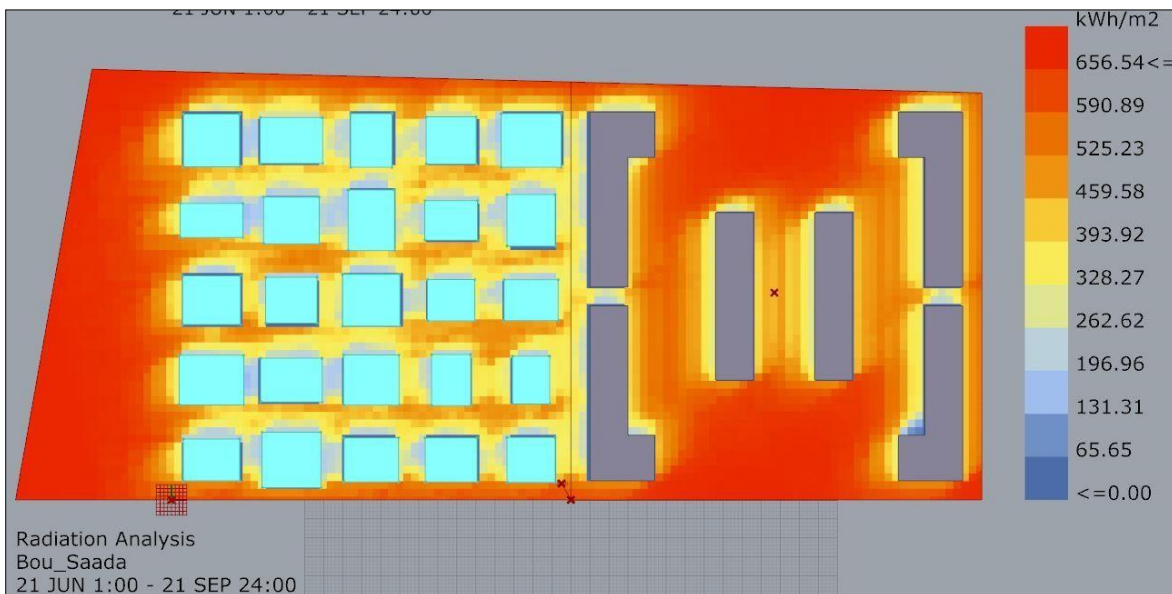


Fig. IV- 21 : La voirie et le tracé rectiligne de l'ancien et nouveau tissu

Une simulation plus approfondie prenant en considération : l'énergie piégée dans le canyon urbain grâce au rayonnement à une large longueur d'ondes, la vitesse du vent et sa température et leur effet sur le confort thermique et l'orientation des voies, aurait des effets plus positifs sur l'amélioration du confort extérieur.

Il nous semble également que le Sky View Factor (SVF) peut être un meilleur paramètre à considérer dans l'optimisation évolutionnaire de la morphologie urbaine par rapport au confort thermique extérieur.

IV.4.1. Deuxième essai

Dans cet essai l'enjeu est de trouver un moyen d'exprimer un algorithme visuel simple qui va produire la forme urbaine. Une tâche intégrale du processus du design paramétrique.

Plusieurs recherches l'ont exploré par des degrés de complexités distinctes et pour des fins bien variées qui ne prennent pas en compte l'aspect du confort. Alors, notre but est de ne pas être limité par ce manque et aussi d'adapter ces procédés dans un processus plus

large qui va être capable d'évaluer la performance du tissu urbain vis-à-vis du confort thermique extérieure.

En 2010, C. Schneider et al, ont évoqué un component développé sous le langage de programmation appelé C#. Comme cas d'étude ils ont appliqué cet algorithme pour concevoir une proposition de design urbain dans un site vide (**Fig. IV- 22**), mais l'aspect environnemental a été négligé. Ils ont pris en considération les obstacles naturels comme ; les nœuds de transport, les parcs, et la rivière. Dans le cadre d'un master, le travail a été divisé entre plusieurs groupes d'étudiants. Chaque groupe devait explorer un seul obstacle, en raison de la complexité et de la longue de la durée nécessaire pour une telle expérimentation et aussi de l'amélioration de l'algorithme.

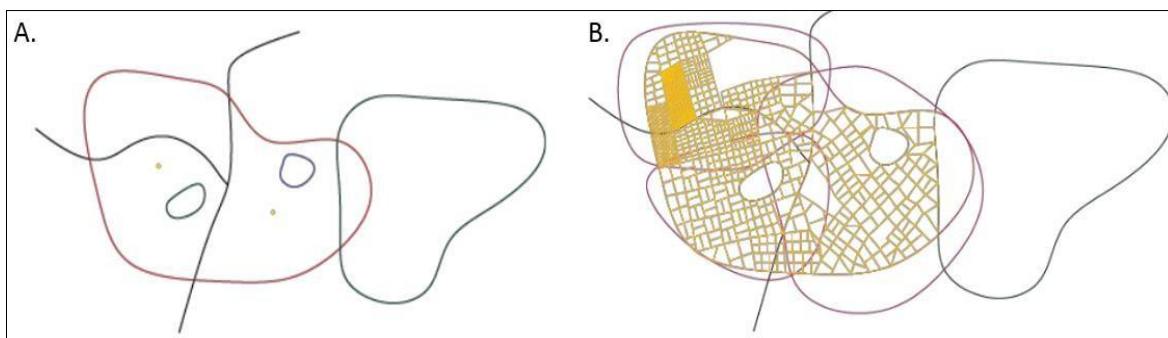


Fig. IV- 22 : Méthode de génération de forme urbaine en considérant les obstacles naturels (Source: C. Schneider et al., 2010). A. les obstacles B. la configuration urbaine générée

En nous basant sur cette recherche, nous avons choisi un modèle plus simple pour la génération de la forme, notamment pour avoir la possibilité de rajouté ce nouveau paramètre (le confort thermique extérieure), car ce dernier va rajouter une complexité supplémentaire. Notre solution consiste à une grille simple qui va générer une forme urbaine simple.

Cet essai nous a servi comme preuve de concept. Nous avons vérifié qu'il est possible dans le cadre du temps pour un étudiant de magistère d'apprendre cet outil (Grasshopper) pour l'appliquer principalement dans un site plus restreint et dans des conditions réelles. Mais, il reste vraiment limité en termes d'indice de confort qui pourrait être vérifié ultérieurement.

L'évaluation du confort thermique extérieur a été établie par un premier essai théorique. Dans ce cas, nous avons le contrôle total sur tous les paramètres formels du tissu urbain : hauteur, largeur et longueur des blocs en plus de l'orientation des voies. Ce dernier nous a permis d'obtenir de meilleurs résultats jusqu'à une certaine limite. Surtout que nous nous sommes retrouvés face à de nombreux problèmes ; telle que la complexité de la forme urbaine où nous ne voyons plus la fin ni le prix de l'investigation. Nous nous sommes aussi confrontés à la durée des calculs, et aux ressources informatiques.

Dans ce travail, nous nous ne limitons pas à la méthode classique de cataloguer toutes les orientations et les rapports H/L des bâtiments et rues, cela a été déjà fait pleinement. L'enjeu maintenant est de tester à quel point la configuration urbaine résultante de l'évolution de la forme urbaine à partir d'une situation initiale défavorable (A) vers une configuration adaptée (B) sans que le concepteur ne fasse ce choix consciemment, mais il va laisser l'outil, Galapagos, le faire d'une manière automatique.

Dans la configuration initiale, la moyenne de la radiation solaire sur tout le site est de 625,6 kWh/m², alors que dans la configuration urbaine optimisée, nous avons obtenu 376,27 kWh/m². Cette dernière est caractérisée par des blocs plus grands et hauts, des voies plus étroites et une orientation de la voirie vers les axes ; Sud-est Nord-ouest, et Nord-est Sud-ouest. Comme nous pouvons le constater dans (**Tab. IV. 1**), les cinq meilleures solutions auxquelles nous avons abouti par l'algorithme sont consistantes dans l'orientation et très proches dans la valeur de la radiation solaire.

Tab. IV. 1 : Les 5 meilleures solutions de l'évolution (source : auteur)

Solution	Radiation solaire en kWh/m²	Orientation
1	376.27	Sud-est Nord-ouest
2	376.54	Sud-est Nord-ouest
3	376.99	Sud-est Nord-ouest
4	377.16	Sud-est Nord-ouest
5	379.82	Sud-est Nord-ouest

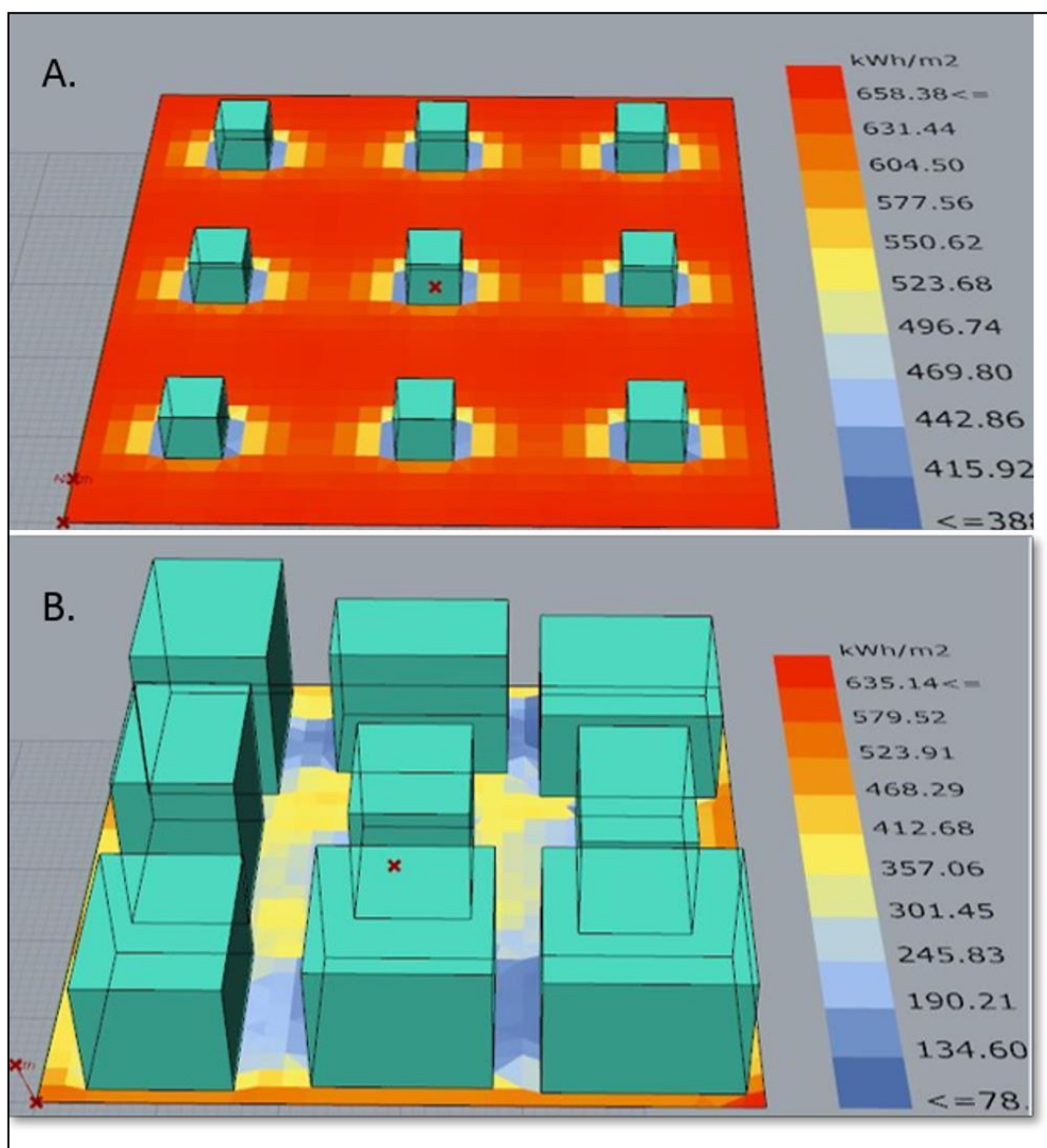


Fig. IV- 23 : Evolution de la forme urbaine guide le but de minimiser la radiation solaire à une hauteur de 1,5m (Source : Auteur)

Les résultats dans la (Fig. IV- 23) montrent que la forme finale attendue par notre algorithme et l'évolution automatique n'est pas parfaite. Tous les blocs devront être dans la taille maximum en hauteur et les rues dans la largeur la plus petites. Cela pour donner un maximum d'ombre et par conséquent un minimum de radiation solaire reçu au niveau de la hauteur 1.5m. Ainsi, nous obtiendrons une amélioration maximale du UTCI et du confort thermique extérieure, avec un seul paramètre, la forme urbaine et l'occultation du soleil par les constructions.

Comme critique, nous pourrions dire que le design évolutionnaire ne donne pas toujours, absolument, la meilleure solution qui existe pour un problème quelconque. Ainsi avec plus de temps, cette recherche pourrait examiner plus de paramètres comme l'albedo des parois et de la rue, la verdure, l'enveloppe solaire, et la vitesse du vent et la température des vents dominants.

Le tissu urbain obtenu semble en concordance avec les résultats de plusieurs recherches telles que ; (F. Bourbia & H. B. Awbi, 2004) et (F. Ali-Toudert, 2005) qui confirment que la forme urbaine a un effet sur le confort thermique. Dans notre cas, nous avons pris la diminution de la radiation solaire en été comme indice d'amélioration du confort.

Conclusion

Pour tester l'influence de la configuration urbaine d'un tissu urbain sur l'amélioration du confort thermique extérieur, nous avons procédé, dans ce chapitre, à la comparaison par la simulation entre deux morphologies (existante et conçue) dans la ville de Bou Saada en période estivale et hivernale.

Nous avons donc présenté les deux essais d'applications choisis pour illustrer le processus d'exploration des outils de design paramétrique dans le but d'améliorer le confort thermique extérieur. Les résultats escomptés n'ont pas été à la hauteur de nos espérances, cependant, la combinaison de la configuration urbaine avec d'autres facteurs tels que la végétation aurait un impact positif sur le confort thermique extérieur.

Dans cette étape nous avons tenté plusieurs essais que nous n'avons pas mentionnés ici, en raison du temps ou des essais infructueux, et principalement, la difficulté de trouver une méthode qui s'adapte à tous les scénarios de la conception. Chaque conception est unique et demande ces propres solutions.

Nous nous rendons compte que la conception à l'aide d'algorithmes nécessite toujours le travail d'une équipe pluridisciplinaire. Cette équipe doit impérativement avoir un informaticien ou bien les architectes qui peuvent investir du temps pour apprendre la programmation, nous avons constaté aussi qu'investir un peu de temps dans l'amélioration

de nos outils pourra nous faire gagner du temps dans la phase de conception et de l'évaluation de plusieurs éventuelles solutions. Dans notre travail, les outils de Ladybug sont Open-source, nous pouvons les modifier et les optimiser pour servir une fin bien précise.

La conclusion à laquelle nous avons abouti, suggère l'utilisation de la grille régulière pour générer les formes urbaines. Par ailleurs, pour simplifier la tâche de calcul et de simulation, l'approche de cellular automata pourra offrir un compromis dans ce domaine, car la géométrie sera simple mais produira plus de complexité dans la forme. Puisque l'élément de base sera toujours le Voxel (petit cube).

Conclusion Générale

Conclusion

Ce travail propose le design paramétrique comme outil d'amélioration du confort thermique extérieur concernant les espaces urbains que se soient ; rue, place, parcours, quartier, allant jusqu'à la conception de villes nouvelles. Cette amélioration devrait avoir lieu dans la phase de l'avant-projet. La végétation et la morphologie urbaine sont des facteurs majeurs dans le confort thermique extérieur, bien que la plantation de la végétation semble être plus facile à concrétiser après la construction du bâtiment dans le cadre d'une réhabilitation urbaine. Nous nous sommes limités à étudier uniquement la partie qui concerne la *forme urbaine*, d'autant plus que ces effets sur le confort thermique doivent être impérativement considérés avant la construction du projet.

L'objectif que nous avons essayé d'atteindre dans ce travail est, de préparer un algorithme qui peut lier la **morphologie urbaine** au **confort thermique extérieur** à l'aide du design paramétrique urbain afin de l'utiliser comme un outil pour l'amélioration du confort thermique extérieur.

Aussi, l'objectif déterminant de ce travail, est d'aspirer à pouvoir évaluer le confort thermique à l'extérieur d'une manière fiable et rapide afin d'avoir l'interactivité nécessaire pour le designer. A la fin de ce travail et après une meilleure compréhension de cet outil, de l'avancement actuel à travers des recherches déjà faites dans ce domaine, et la critique de ces travaux, nous avons adoptés une démarche qui explique les étapes suivies et notre raisonnement dans la formulation de ce mémoire comme suit :

Le premier chapitre présente les concepts questionnés du sujet avec un état de l'art sur le réchauffement planétaire et ses effets néfastes révélés par les températures extrêmes. Ainsi que, l'importance du confort thermique extérieur pour le bon fonctionnement de la ville. Et enfin, le potentiel du design paramétrique comme un changement de paradigme dans la conception de la ville d'une manière intelligente et interactive.

Le deuxième chapitre expose, une compréhension plus profonde du confort thermique extérieur. Ainsi que les différentes approches de la modélisation de cette sensation plutôt subjective afin de la quantifier. Et enfin choisir un indice représentatif du confort thermique pour l'employer plus tard dans l'algorithme que nous proposons ultérieurement.

Le troisième chapitre s'étale davantage sur l'aspect théorique de ce nouveau paradigme et explique les outils que nous allons employer dans notre algorithme. Nous avons aussi tenté de faire une étude critique sur quelques travaux similaires préliminaires qui ont essayé de résoudre la complexité de la multitude de problématique de ce travail.

Le quatrième chapitre illustre quelques essais d'application choisis parmi la multitude d'approches que nous avons effectuées. Nous commençons par détailler notre algorithme qui va générer la forme urbaine dans une grille régulière. Cette approche est plus adaptée aux indices qui demandent beaucoup de temps pour les calculer (la simplification de la forme diminue le temps de calculs). Un deuxième essai qui illustre la possibilité de faire tout le processus de conception et d'évaluation sous la même plateforme. Enfin, tout cela est concrétisé dans un exemple réel appliqué sous le climat semi-aride dans la ville de Bou Saada.

- Apports de la recherche

Dans le domaine de l'architecture bioclimatique nous utilisons intensivement les mesures sur terrain et la simulation. L'intérêt de ce travail est :

- D'inciter au changement de paradigme vis-à-vis de la manière de la conception urbaine et du design urbain.
- D'explorer un autre volet de l'architecture en générale par l'accessibilité à l'information et la simulation.
- L'utilisation de la simulation dans la conception.
- L'utilisation de l'ordinateur comme outil de recherche de solutions étayées par l'information issu de la simulation.
- Utiliser la puissance (force et vigueur) du design paramétrique pour explorer plusieurs solutions alternatives et interactives tous en respectant les conditions déjà établies par le concepteur (à titre d'exemple : le confort thermique extérieur)
- Concevoir un algorithme simple à titre d'exemple qui peut générer la forme urbaine, l'évaluer et l'optimiser dans la même plateforme (Rhino/Grasshopper).

- Difficultés et limitations

Dans chaque travail de recherche il est possible de rencontrer des difficultés soient technique ou de faisabilité ou autres. Notre travail ne fait pas l'exception, nous avons rencontré plusieurs difficultés :

- Le coté nouveau (design paramétrique) de notre sujet de recherche. Il s'agit d'une tâche assez complexe que de maîtriser le logiciel Rhinoceros et son plugin Grasshopper.
- d'une part, les outils qui existent sous Grasshopper sont en développement continu, ce qui nous expose constamment aux surprises inattendues, et dès le début, il y eut des bugs. D'autre part, l'outil est incomplet où il nous manque jusqu'à présent des fonctionnalités très importantes (comme la prise en charge de la végétation dans la simulation).
- A cause du caractère complexe (exploratif, qualitatif et quantitatif de notre recherche) nous avons été contraints de choisir une approche autre que l'expérimentale qui est plus répandue dans le domaine de l'architecture bioclimatique en général.

- Futures pistes de recherche

Cet humble travail a traité quelques aspects du confort thermique extérieur en guise de simplifier ce processus de design urbain à caractère complexe. Nous voudrions dans des futures recherches intégrer les aspects suivants :

- La règlementation urbaine
- L'effet de la vitesse de l'air sur le confort thermique.
- L'effet de la Temperature moyenne radiante qui est très compliquée à calculer et qui demande un algorithme spécial, et aussi la modélisation des bâtiments adjacents pour avoir la température surfacique extérieure.
- L'effet de la végétation et la prise en charge de son effet dans le calcul de l'UTCI.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

1. **Adolphe L.** (2001). «*A simplified model of urban morphology: Application to an analysis of the environmental performance of cities*». *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 183–200.
2. **Adolphe Luc.** (2001). «*Modelling the Link Between Built Environment and Urban Climate: Towards Simplified Indicators of the City Environment .*». *Seventh International*, 679–684.
3. **Akbari H. & Taha H.** (1992). «*The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities*». *Energy*, 17(2), 141–149.
4. **Al-qattan E. Yan W. Galanter P. Computing P. User-interface T. & Automata C.** (2017). «*Tangible Computing for Establishing Generative Algorithms*». *PARAMETRIC AND GENERATIVE DESIGN*, 2(1), 363–370.
5. **Ali-Toudert F.** (2005). «*Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate*». *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*. Retrieved from <http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/2005/2078/>
6. **Ali-Toudert F. Djenane M. Bensalem R. & Mayer H.** (2005). «*Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria*». *Climate Research*, 28(3), 243–256.
7. **Ali-Toudert F. Mayer H. & Mayer F.A.H.** (2007). «*Effects of Street Design on Outdoor Thermal Comfort*». *Sci.U-Szeged.Hu*, 42(3), 1553–1554. Retrieved from <http://www2.sci.u-szeged.hu/eghajlattan/baba/Ali-Toudert.pdf%5Cnhttp://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132305005366>
8. **American Society of Heating R. and A.-C.E.** (1989). «*1989 ASHRAE handbook: fundamentals*». Atlanta, GA.: ASHRAE.
9. **Angelotti A. Dessì V. & Scudo G.** (2007). «*The evaluation of thermal comfort conditions in simplified urban spaces: the COMFA + model*». *2nd PALENC Conference*, 1(September), 65–69.
10. **Arens E. Hoyt T. Zhou X. Huang L. Zhang H. & Schiavon S.** (2015). «*Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors*». *Building and Environment*, 88, 3–9. Retrieved from

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.004>
11. **ASHRAE Standard 55.** (2013). «*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*». American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 8400, 2013.
 12. **Atmaca I. Kaynakli O. & Yigit A.** (2007). «*Effects of radiant temperature on thermal comfort*». *Building and Environment*, 42(9), 3210–3220. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132306002253>
 13. **Bajšanski I. V. Milošević D.D. & Savić S.M.** (2015). «*Evaluation and improvement of outdoor thermal comfort in urban areas on extreme temperature days: Applications of automatic algorithms*». *Building and Environment*, 94, 632–643.
 14. **Bande L. Cabrera A.G. Afshari A. & Martin M.** (2015). «*Evaluation of Smart Shading Structures in Mitigating Urban Heat Island in a district of a Hot Arid Climate City (Abu Dhabi).*», 1–6.
 15. **Baptista P.** (2012). «*ADAPTIVE DESIGN: A Generative Energy Efficient Design Approach*». Oxford Brookes.
 16. **Behnam S.J. Zarabadi Z.S. & Systems A.C.** (2017). «*Parametric Design as an Approach to Respond to Complexity*», 11(7), 875–880.
 17. **Beirão J.** (2012). «*CityMaker; Designing Grammars for Urban Design*». *A+BE | Architecture and the Built Environment* (Vol. 2). Retrieved from <http://abe.tudelft.nl/article/view/beirao/>
 18. **Beirão José N Nourian P. & Walderveen B. van.** (2011). «*Parametric ‘ Route Structure ’ Generation and Analysis an Interactive Design System Application for Urban Design*». *Diversity and Unity*.
 19. **Beirão José Nuno Arrobas P. & Duarte J.P.** (2012). «*Parametric Urban Design: Joining morphology and urban indicators in a single interactive model*». *Digital Physicality-Proceedings of the 30th ECAADe ...*, 1, 167–176.
 20. **Bellara S. & Abdou S.** (2012). «*Effet de l’ombrage sur le confort thermique et visuel dans les espaces extérieurs: cas de l’esplanade de l’Université Mentouri de Constantine*». *Revue «Nature & Technologie*, 27, 27, 26–37.
 21. **Bielik M. Schneider S. & Koenig R.** (2012). «*Parametric Urban Patterns - Exploring and integrating graph-based spatial properties in parametric urban*

- modelling*». In *eCAADe 2012* (pp. 701–708).
22. **Blazejczyk K. Broede P. Fiala D. Havenith G. Holmér I. Jendritzky G. ... Kunert A.** (2010). «*Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale*». *Miscellanea Geographica*, 14, 91–102.
23. **Blazejczyk K. Epstein Y. Jendritzky G. Staiger H. & Tinz B.** (2012). «*Comparison of UTCI to selected thermal indices*». *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515–535. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21614619>
24. **Blazejczyk K. Jendritzky G. Bröde P. Fiala D. Havenith G. Epstein Y. ... Kampmann B.** (2013). «*An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI)*». *Geographia Polonica*, 86(1), 5–10.
25. **Bonichon F.** (1997). «*How to read a scientific article*». *Cancer Radiotherapie : Journal de La Societe Francaise de Radiotherapie Oncologique*, 1(5), 397–406.
26. **Boukhelkhal I. & Bourbia F.** (2016). «*Thermal Comfort Conditions in Outdoor Urban Spaces: Hot Dry Climate -Ghardaia- Algeria*». *Procedia Engineering*, 169, 207–215. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816332271>
27. **Bourbia F. & Awbi H.B.** (2004a). «*Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 1: Air and surface temperature measurements*». *Renewable Energy*, 29(2), 249–262.
28. **Bourbia F. & Awbi H.B.** (2004b). «*Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 2: Shading simulations*». *Renewable Energy*, 29(2), 249–262.
29. **Bourbia F. & Boucheriba F.** (2010). «*Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine)*». *Renewable Energy*, 35(2), 343–347. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.017>
30. **Bouyer J.** (2009). «*Modélisation et simulation des microclimats urbains: Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*».
31. **Bouyer J. Musy M. Huang Y. & Athamena K.** (2011). «*Mitigating Urban Heat*

- Island Effect by Urban Design: Forms and Materials*». In *CITIES AND CLIMATE CHANGE* (pp. 164–181).
32. **Bröde P. Blazejczyk K. Fiala D. Havenith G. Holmér I. Jendritzky G. ... Kampmann B.** (2013). «*The Universal Thermal Climate Index UTCI compared to ergonomics standards for assessing the thermal environment.*». *Industrial Health*, 51, 16–24. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23411753>
33. **Bröde P. Krüger E.L. & Fiala D.** (2013). «*UTCI: Validation and practical application to the assessment of urban outdoor thermal comfort*». *Geographia Polonica*, 86(1), 11–20.
34. **Bröde P. Krüger E.L. Rossi F.A. & Fiala D.** (2012). «*Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI—a case study in Southern Brazil*». *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 471–480. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/s00484-011-0452-3>
35. **Brown R. D. & Gillespie T.J.** (1986). «*Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model*». *International Journal of Biometeorology*, 30(1), 43–52.
36. **Brown Robert D.** (2010). «*Design with Microclimate The Secret to Comfortable Outdoor Space*». *Landscape Research* (Vol. 37). Washington: ISLAND PRESS. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01426397.2012.682393>
37. **Brown Robert D. & Gillespie T.J.** (1995). «*Microclimate landscape design: Creating thermal comfort and energy efficiency*», 208.
38. **Çağdaş G. Özkar M. Gül L.F. & Gürer E. (Eds.)**. (2017). «*Computer-Aided Architectural Design. Future Trajectories*». *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 724). Singapore: Springer Singapore. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-5197-5>
39. **Caldas L.** (2008). «*Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system*». *Advanced Engineering Informatics*, 22(1), 59–70. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474034607000493>
40. **Çalışkan O.** (2017). «*Parametric Design in Urbanism: A Critical Reflection*».

- Planning Practice & Research, 7459(October), 1–27. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02697459.2017.1378862>
41. **Camporeale P.** (2013). «*Genetic Algorithms Applied to Urban Growth Optimization: Solar envelope and solar fan*». In *Computation and Performance: Proceedings of the 31st conference on education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2013)* (Vol. 2, pp. 227–236).
42. **Canuto R. & Amorim L.** (2012). «*Establishing parameters for urbanity*». Proceedings of the 8th International Space Syntax Symposium, 1, 1–18.
43. **Chatzipoulka C. Nikolopoulou M. & Watkins R.** (2015). «*The impact of urban geometry on the radiant environment in outdoor spaces*». ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, 1–6.
44. **Chen L. & Ng E.** (2012). «*Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade*». *Cities*, 29(2), 118–125. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264275111001053>
45. **Choi E.C.C.** (2009). «*Proposal for unified terrain categories exposures and velocity profiles*». The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, (1), 1–9.
46. **Chowdhury S. & Schnabel M.A.** (2018). «*An Algorithmic Methodology to Predict Urban Form - An Instrument for Urban Design*». In *Learning, Adapting and Prototyping - Proceedings of the 23rd CAADRIA Conference - Volume 2*, (Vol. 2, pp. 401–410).
47. **Coccolo S. Kämpf J. Scartezzini J.L. & Pearlmutter D.** (2016). «*Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards*». *Urban Climate*, 18, 33–57. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.004>
48. **Coccolo S. Pearlmutter D. Kaempf J. & Scartezzini J.L.** (2018). «*Thermal Comfort Maps to estimate the impact of urban greening on the outdoor human comfort*». *Urban Forestry and Urban Greening*, 35, 91–105. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.08.007>
49. **Daher E.** (2014). «*Modélisation paramétrique des abris et camps d'urgence*», (Nancy 1), 1–74.

-
50. **Dallal N.A.F.A. El.** (2014). «*Parametric Urbanism A Climate Responsive Urban Form for the MENA Region*».
51. **Davis D.** (2013). «*Modelled on Software Engineering : Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture*», (February), 243.
52. **Davis D. & Peters B.** (2013). «*Design ecosystems: Customising the architectural design environment with software plug-ins*». *Architectural Design*, 83(2), 124–131.
53. **de Lieto Vollaro A. de Simone G. Romagnoli R. Vallati A. & Botillo S.** (2014). «*Numerical study of urban canyon microclimate related to geometrical parameters*». *Sustainability (Switzerland)*, 6(11), 7894–7905.
54. **DECOI.** (2000). «*Technological latency : from autoplasic to alloplastic*». *Digital Creativity*, 11(3), 131–143.
55. **El-Zanfaly D.E.E.-D.H.** (2009). «*An algorithmic approach to digital architectural Design*».
56. **Elnabawi M.H. Hamza N. & Dudek S.** (2015). «*Numerical modelling evaluation for the microclimate of an outdoor urban form in Cairo, Egypt*». *HBRC Journal*, 11(2), 246–251. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S168740481400025X>
57. **Elwy I. Ibrahim Y. Fahmy M. & Mahdy M.** (2018). «*Outdoor microclimatic validation for hybrid simulation workflow in hot arid climates against ENVI-met and field measurements*». *Energy Procedia*, 153, 29–34. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.009>
58. **Fabbri K.** (2015). «*A Brief History of Thermal Comfort: From Effective Temperature to Adaptive Thermal Comfort*». In *Indoor Thermal Comfort Perception* (pp. 7–23). Cham: Springer International Publishing. Retrieved from http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-18651-1_2
59. **Fanger P.O.** (1970). «*Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*». ... *Comfort Analysis and Applications in Environmental ...*
60. **Feng H. & Zhang Y.** (2009). «*Computational Urbanism - a Parametric Relational Urban Model for Urban Plot*». *The New Urban Question – Urbanism beyond Neo-Liberalism: The 4th International Conference of the International Forum on Urbanism*, 1097–1106.

61. **Fiala D. Havenith G. Br?de P. Kampmann B. & Jendritzky G.** (2012). «*UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation*». *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 429–441.
62. **Fiala D. Lomas K.J. & Stohrer M.** (1999). «*A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system*». *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md. : 1985), 87(5), 1957–1972.
63. **Fiala D. Lomas K.J. & Stohrer M.** (2001). «*Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions*». *Int J Biometeorol*, 45(3), 143–159. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cmedm&AN=11594634&site=ehost-live>
64. **Gagge A.P.** (1936). «*The Linearity Criterion as Applied to Partitional Calorimetry*». *American Journal of Physiology -- Legacy Content*, 116(3), 656 LP – 668.
65. **Gagge A.P.** (1971). «*An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response*». *ASHRAE Transactions*, 77(1), 247–262.
66. **Gagge A.P. Fobelets A.P. & Berglund L.G.** (1986). «*A standard predictive index of human response to the thermal environment*». In *ASHRAE Transactions*, 92(2B) (Vol. 92(2B), pp. 709–731). United States.
67. **Gerber D.J.** (2007). «*Parametric practices: Models for design exploration in architecture*». Harvard.
68. **Gerber D.J. & Lin S.-H.E.** (2014). «*Designing in complexity: Simulation, integration, and multidisciplinary design optimization for architecture*». *SIMULATION*, 90(8), 936–959. Retrieved from <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0037549713482027>
69. **Givoni B.** (1998). «*Climate considerations in building and urban design*». *Building*, 241–300.
70. **Goldberg V. Kurbjuhn C. & Bernhofer C.** (2013). «*How relevant is urban planning for the thermal comfort of pedestrians? Numerical case studies in two districts of the City of Dresden (Saxony/Germany)*». *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 739–751.
71. **Gratia E. & De Herde A.** (2006). «*Thermique des immeubles de bureaux*». Presses

- univ. de Louvain.
72. **Grimmond C.S.B. Potter S.K. Zutter H.N. & Souch C.** (2001). «*Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas*». *International Journal of Climatology*, 21(7), 903–913. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.659/pdf>
73. **Harding J. Joyce S. Shepherd P. & Williams C.** (2012). «*Thinking Topologically at Early Stage Parametric Design*». *Advances in Architectural Geometry 2012*, 67–76. Retrieved from <http://opus.bath.ac.uk/31469/>
74. **Harding J. Joyce S. Shepherd P. Williams C. Joyce S. Shepherd P. & Williams C.** (2013). «*Thinking Topologically at Early Stage Parametric Design*». *Advances in Architectural Geometry 2012*, 67–76. Retrieved from http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-7091-1251-9_5
75. **Hatefnia N. & Ghobad M.** (2015). «*COMPUTING OUTDOOR COMFORT BASED ON CBE THERMAL COMFORT CALCULATION FOR ASHRAE-55*», 371–380.
76. **Havenith G. Fiala D. Blazejczyk K. Richards M. Bröde P. Holmér I. ... Jendritzky G.** (2012). «*The UTCI-clothing model*». *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 461–470. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/s00484-011-0451-4>
<http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00484-011-0451-4.pdf>
77. **Heidarinejad M. Gracik S. Sadeghipour Roudsari M. Khoshdel Nikkho S. Liu J. Liu K. ... Srebric J.** (2016). «*Influence of building surface solar irradiance on environmental temperatures in urban neighborhoods*». *Sustainable Cities and Society*, 26, 186–202. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.011>
78. **HONJO T. & Onjo T.H.** (2009). «*Thermal Comfort in Outdoor Environment*», 43–47.
79. **Höppe P.** (1984). «*Die Energiebilanz des Menschen*». *Wiss Mitt Meteorol Inst Univ München*, 49, 173.
80. **Höppe P.** (1993). «*Heat balance modelling*». *Experientia*, 49(9), 741–746.
81. **Höppe P.** (1999). «*The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*». *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75. Retrieved from

- <http://link.springer.com/10.1007/s004840050118>
82. **Höppe P.** (2002). «*Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort*». *Energy and Buildings*, 34(6), 661–665.
 83. **Hsie T.** (2008). «*Achieving Urban Sustainability through Urban Morphology Analyses and Optimum Ventilation*». *Architecture.Ucd.Ie*, (October).
 84. **Huang J. Cedeño-Laurent J.G. & Spengler J.D.** (2014). «*CityComfort+ : A simulation-based method for predicting mean radiant temperature in dense urban areas*». *Building and Environment*, 80, 84–95. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.019>
 85. **Huang J. Guillermo J. Laurent C. Spengler J.D. & Reinhart C.F.** (2006). «*A GIS-based assessment method for mean radiant temperature in dense urban areas.*».
 86. **Jendritzky G. de Dear R. & Havenith G.** (2012). «*UTCI-Why another thermal index?*». *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421–428.
 87. **Jendritzky Greg, Dear de Ronald H.G. Jendritzky G. Havenith G. P. W. & E. B.** (2009). «*Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for Assessing the Thermal Environment of the Human Being.*». Final Report COST Action 730.
 88. **Karle D. & Kelly B.M.** (2011). «*Parametric Thinking*». *ACADIA Regional 2011 Parametricism SPC*, 109–113.
 89. **Kenny N.A. Warland J.S. Brown R.D. & Gillespie T.G.** (2009a). «*Part A: Assessing the performance of the COMFA outdoor thermal comfort model on subjects performing physical activity*».
 90. **Kenny N.A. Warland J.S. Brown R.D. & Gillespie T.G.** (2009b). «*Part B: Revisions to the COMFA outdoor thermal comfort model for application to subjects performing physical activity*». *International Journal of Biometeorology*, 53(5), 429–441.
 91. **Koenig R.** (2011). «*Generating urban structures: A method for urban planning supported by multi-agent systems and cellular automata*».
 92. **Koenig R. & Bauriedel C.** (2004). «*Computergenerierte Stadtstrukturen*», 147.
 93. **Koenig R. & Bauriedel C.** (2009). «*Generating settlement structures: A method for urban planning and analysis supported by cellular automata*». *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(4), 602–624.

-
94. **Koenig R. Miao Y. Knecht K. & Mei-chih C.** (2017). «*Interactive Urban Synthesis Computational*», 724, 23–41. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-5197-5>
95. **Koenig R. Treyer L. & Schmitt G.** (2013). «*Graphical smalltalk with my optimization system for urban planning tasks*». Proceedings of the 31st ECAADe Conference – Volume 2, (1988), 195–203. Retrieved from [http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?_id=ecaade2013_197&sort=DEFAULT&search=Koenig Reinhard&hits=10](http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?_id=ecaade2013_197&sort=DEFAULT&search=KoenigReinhard&hits=10)
96. **Kolarevic B.** (2005). «*Architecture in the digital age : design and manufacturing*». Taylor & Francis.
97. **Konis K. Gamas A. & Kensek K.** (2016). «*Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support*». Solar Energy, 125(FEBRUARY), 161–179. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.020>
98. **Konya A.** (1982). «*Design Primer for Hot Climates*». *Building Services Engineering Research and Technology* (Vol. 3).
99. **Krishnamurti R.** (2011). «*Bridging parametric shape and parametric design*». SDC'10: NSF International Workshop on Studying Visual and Spatial Reasoning for Design Creativity, 1–20.
100. **Krüger E.L. & Bröde P.** (2013). «*Analyzing the Relationship between Local Urban Morphology and Predicted Thermal Perception Using the Universal Thermal Climate Index UTCI*». Plea 2013, (September), 1–6.
101. **Lagios K. Niemasz J. Reinhart C.F. & Reinhart F C.** (2009). «*Animated Building Performance Simulation (Abps) – Linking Rhinoceros/Grasshopper With Radiance/Daysim*». SimBuild 2010, (August), 321–327.
102. **Leach N.** (2014). «*Parametrics Explained*». Next Generation Building, 1, 1–10. Retrieved from <http://default.portal.igpublish.com/iglibrary/browse/journal/article/NGBJ0000004.html>
103. **Lee Y.Y. Kelundapyan R. Hanipah M.H. & Abdullah A.H.** (2017). «*A*

- Review on Outdoor Thermal Comfort Evaluation for Building Arrangement Parameters*». Sustainable Construction and Building Technology, (June), 1–15.
104. **Lin T. Matzarakis A. & Liu Y.** (2008). «*Outdoor thermal comfort acceptable range and campus microclimate in hot-humid region*». Urbanclimate.Net, 247–252.
105. **Lindberg F. & Grimmond C.S.B.** (2011). «*The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation*». Theoretical and Applied Climatology, 105(3), 311–323.
106. **Lindberg F. Holmer B. & Thorsson S.** (2008). «*SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings*». International Journal of Biometeorology, 52(7), 697–713.
107. **LOPES J. V. PAIO A.C. & SOUSA J.P.** (2014). «*Parametric Urban Models Based on Frei Otto'S Generative Form-Finding Processes*». 19th International Conference on Computer- Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA, (May), 595–604.
108. **Machairas V. Tsangrassoulis A. & Axarli K.** (2014). «*Algorithms for optimization of building design: A review*». Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31(1364), 101–112.
109. **Mackey C. Galanos T. Norford L. & Roudsari M.S.** (2017). «*Wind , Sun , Surface Temperature , and Heat Island: Critical Variables for High-Resolution Outdoor Thermal Comfort*». In *15th IBPSA Conference* (pp. 985–993). Retrieved from <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.260>
110. **Marko Jovanović.** (2016). «*Genetic algorithm application as a sustainable urban planning optimization tool.*». In *Between Computational Models and Performative Capacities* (p. Tepavčević, Bojan Stojaković, Vesna). Novi Sad, Serbia.
111. **Matzarakis A. Mayer H. & Iziomon M.G.M.G.M.G.** (1999). «*Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature*». International Journal of Biometeorology, 43(2), 76–84. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/s004840050119>
112. **Matzarakis A. Rutz F. & Mayer H.** (2010). «*Modelling radiation fluxes in*

- simple and complex environments: Basics of the RayMan model*». International Journal of Biometeorology, 54(2), 131–139.
113. **Mayer H. & Höppe P.** (1987). «*Thermal comfort of man in different urban environments*». Theoretical and Applied Climatology, 38(1), 43–49.
114. **Melki D.K.R. and H.H. (Ed.)**. (2005). «*22nd International Conference PLEA2005 vol.1of2*». In *Environmental Sustainability: The Challenge of Awareness in Developing Societies*. NDU Publishing.
115. **Milošević D.D. Bajšanski I. V. & Savić S.M.** (2017). «*Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways*». Urban Forestry and Urban Greening, 23, 113–124. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.011>
116. **Mostapha Sadeghipour Roudsari, Michelle Pak, Smith A. Roudsari M.S. & Pak M.** (2013). «*Ladybug: a Parametric Environmental Plugin for Grasshopper To Help Designers Create an Environmentally-Conscious Design*». 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, 3129–3135.
117. **Mukherjee M. & Mahanta S.** (2014). «*Outdoor thermal comfort: A review on the concepts, parameters and methods to evaluate thermal comfort in outdoor space. Archit*». Time Space People, 16–22.
118. **Müller P. Wonka P. Haegler S. Ulmer A. & Van Gool L.** (2006). «*Procedural modeling of buildings*». ACM Transactions on Graphics, 25(3), 614.
119. **Musleh M.A.M.** (2012). «*Parametric Design Optimization in Sustainable Urban Design : In Hot Climate*».
120. **Nazarian N. Acero J.A. & Norford L.** (2019). «*Outdoor thermal comfort autonomy: Performance metrics for climate-conscious urban design*». Building and Environment, (May). Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.028>
121. **Nazarian N. Fan J. Sin T. Norford L. & Kleissl J.** (2017). «*Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: A 3D numerical model for standard effective temperature*». Urban Climate, 20(April), 251–267. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.011>
122. **Nazarian N. Sin T. & Norford L.** (2018). «*Numerical modeling of outdoor thermal comfort in 3D*». Urban Climate, 26(March), 212–230. Retrieved from

- <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095518300786>
123. **Nikolopoulou M.** (2011). «*Outdoor thermal comfort.*». *Frontiers in Bioscience (Scholar Edition)*, 3(April 2014), 1552–1568. Retrieved from <http://www.bioscience.org/2011/v3s/af/245/list.htm>
 124. **Nourian P. Rezvani S. & Sariyildiz S.** (2010). «*Designing with Space Syntax*», 1, 357–366.
 125. **Ould-henia A.** (2003). «*CHOIX CLIMATIQUES ET CONSTRUCTION ZONES ARIDES ET SEMI ARIDES*».
 126. **Oxman R.** (2006). «*Theory and design in the first digital age*». *Design Studies*, 27(3), 229–265.
 127. **Oxman R. & Gu N.** (2015). «*Theories and Models of Parametric Design Thinking*». *Real Time - Proceedings of the 33rd ECAADe Conference Vienna, Austria*, 16-18 September, 2, 477–482.
 128. **Parish Y.I.H. & Müller P.** (2001). «*Procedural modeling of cities*». *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '01*, (August), 301–308. Retrieved from <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=383259.383292>
 129. **Park S. Tuller S.E. & Jo M.** (2014). «*Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments*». *Landscape and Urban Planning*, 125, 146–155. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.014>
 130. **Pearlmutter D. Berliner P. & Shaviv E.** (2006). «*Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy*». *Building and Environment*, 41(6), 783–795. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036013230500137X>
 131. **Pedraza E.T.** (2004). «*Information Architecture & Future Cities*».
 132. **Peponis J. Feng C. Green D. Haynie D. Kim S.H. Sheng Q. ... Wang H.** (2015). «*Syntax and parametric analysis of superblock patterns*», 6(1), 109–141.
 133. **Pickup J. & de Dear R.** (1999). «*An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*) - Part I - The model and its assumptions*». *Selected Papers from ICB-ICUC*, (January), 279–283.

-
134. **Prousalidou E. & Hanna S.** (2007). «*A Parametric Representation of Ruled Surfaces*». *Computer-Aided Architectural Design Futures (CAADFutures) 2007*, (DeCOi 2000), 265–278. Retrieved from http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-6528-6_20
135. **Raboudi K. Belkaïd A. & Ben Saci A.** (2011). «*Système multi agents pour la modélisation du volume englobant solaire*». *Proceedings of the Biskra Architecture and Sustainability International Conference (BASC'2011)*.
136. **Raboudi K. & Ben Saci A.** (2014). «*Génération de volumes de contrôle solaire*». In *Interaction(s) des maquettes numériques* (pp. 221–231).
137. **Raboudi K. & Saci A.B.E.N.** (2013). «*A morphological generator of urban rules of solar control*». *PLEA 2013: Sustainable Architecture for a Renewable Future*, (September).
138. **Rakha T.** (2015). «*Towards Comfortable and Walkable Cities: Spatially Resolved Outdoor Thermal Comfort Analysis Linked to Travel Survey-based Human Activity Schedules*». *Massachusetts Institute of Technology*.
139. **Ramadan M.F.A. & Mohamad Fahmy A. Ramadan.** (2010). «*Interactive urban form design of local climate scale in hot semi-arid zone*». *Mohamad Fahmy A. Ramadan*, (September).
140. **Ratti C. & Morello E.** (2005). «*21st Century Milan : using new image processing techniques to assess the environmental quality of the Milan Trade Fair masterplan*». *PLEA2005 - The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture.*, 1/3.
141. **Redon E.** (2017). «*Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique*».
142. **Rutten D.** (2013). «*Galapagos: On the logic and limitations of generic solvers*». *Architectural Design*, 83(2), 132–135.
143. **Salat S. Chen M. & Liu F.** (2014). «*Planning Energy Efficient and Livable Cities: Mayoral Guidance Note #6*», 30.
144. **Saleh M.M. & Al-Hagla K.S.** (2012). «*Parametric Urban Comfort Envelope An Approach toward a Responsive Sustainable Urban Morphology*». *Waset.Org*, 6(11), 563–570.

-
145. **Samson A.** (2012). «*Parametric Urbanism : The Means to a Beginning*», 1–13.
146. **Samuelson H. Bhooshan S. & Goldstein R.** (2015). «*Proceedings of the Symposium for Architecture and Urban Design*». *SimAUD 2015*.
147. **Schnabel M.A.** (2007). «*Parametric Designing in Architecture*». Proceedings of the 12th Computer Aided Architectural Design Futures (CAAD Futures), 237–250. Retrieved from http://download-v2.springer.com/static/pdf/601/chp%253A10.1007%252F978-1-4020-6528-6_18.pdf?token2=exp=1432319729~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F601%2Fchp%25253A10.1007%25252F978-1-4020-6528-6_18.pdf*~hmac=19434756ee6137c7b0b324d9951217041aeb91c506907d058816a6ccf2
148. **Schneider C. Koltsova A. Schmitt G. & Strasse W.P.** (2010). «*Components for Parametric Urban Design in Grasshopper . From Street Network to Building Geometry .*». *Building*, 68–75.
149. **Schumacher P.** (2009). «*Parametricism: A new global style for architecture and urban design*». *Architectural Design*, 79(4), 14–23. Retrieved from <http://doi.wiley.com/10.1002/ad.912>
150. **Shaviv E. Yezioro A. & Capeluto I.G.** (2001). «*Sun and winds in a new business district in Tel Aviv*». In *IBPSA* (pp. 151–158).
151. **Shi Z. Fonseca J.A. & Schlueter A.** (2017). «*A review of simulation-based urban form generation and optimization for energy-driven urban design*». *Building and Environment*, 121, 119–129. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.006>
152. **Stavric M. & Marina O.** (2011). «*Parametric Modeling for Advanced Architecture*». *International Journal of Applied Mathematics and Informatics*, 5(1), 9–16.
153. **Tebbani H. & Bouchahm Y.** (2016). «*Caractérisation du confort thermique dans les espaces extérieurs : Cas de la ville d'Annaba*». *Nature & Technology*, (15), 14–25.
154. **Thorsson S. Honjo T. Lindberg F. Eliasson I. & Lim E.-M.** (2007).

- «*Thermal Comfort and Outdoor Activity in Japanese Urban Public Places*». *Environment and Behavior*, 39(5), 660–684. Retrieved from <http://eab.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0013916506294937>
155. **Touloupaki E. & Theodosiou T.** (2017). «*Performance Simulation Integrated in Parametric 3D Modeling as a Method for Early Stage Design Optimization—A Review*». *Energies*, 10(5), 637. Retrieved from <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/637>
156. **Vanegas C. a. Garcia-Dorado I. Aliaga D.G. Benes B. & Waddell P.** (2012). «*Inverse design of urban procedural models*». *ACM Transactions on Graphics*, 31(6), 1. Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2366145.2366187>
157. **Vanos J.K. Warland J.S. Gillespie T.J. & Kenny N.A.** (2012). «*Improved predictive ability of climate-human-behaviour interactions with modifications to the COMFA outdoor energy budget model*». *International Journal of Biometeorology*, 56(6), 1065–1074.
158. **Varaku E.** (2013). «*Computational Architecture : Focusing on perception and functionality aspects of urban intervention*».
159. **Vesely O.** (2018). «*Parametric assistance for complex urban planning processes / DeCodingSpaces Toolbox*».
160. **Vidmar J.** (2013). «*Evaluation of simulation tools for assessment of urban form based on physical performance*».
161. **Vinet J.** (2000). «*Contribution à la modélisation thermo-aéroulrique du microclimat urbain . Caractérisation de l ' impact de l ' eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs.*». l'Ecole d'Architecture de Nantes.
162. **White M. Hu Y. Langenheim N. Ding W. & Burry M.** (2016). «*Cool City Design : Integrating Real-Time Urban Canyon Assessment into the Design Process for Chinese and Australian Cities*». *Urban Planning*, 1(3), 25–37. Retrieved from <http://www.cogitatiopress.com/ojs/index.php/urbanplanning/article/view/646>
163. **Woodbury R.F.** (2010). «*Elements of Parametric Design*». New York.
164. **Wooff S.** (2016). «*Parametric Urbanism Parametric Urbanism Master of Architecture*». Carleton University Ottawa, Ontario.

Webographie

1. <https://www.food4rhino.com>
2. <https://www.grasshopper3d.com>
3. <https://www.shapediver.com/>
4. <https://www.britannica.com/place/Algeria>
5. <https://www.britannica.com/place/Bou-Saada>
6. <https://www.wallacei.com/chinese-university-of-hongkong>
7. <https://www.food4rhino.com>
8. <https://www.food4rhino.com/app/ladybug-tools>

Annexes

Bou-Saada

Location name

35.33

Latitude [°N]

4.2

Longitude [°E]

605150

WMO

461

Altitude [m a.s.l.]

IV, 1

Climate region

Standard

Radiation model

Standard

Temperature model

Perez

Tilt radiation model

2000–2009

Temperature period

1991–2010

Radiation period

Additional information

Uncertainty of yearly values: Gh = 7%, Bn = 13%, Ta = 0.3 °C

Trend of Gh / decade: 0.5%

Variability of Gh / year: 3.6%

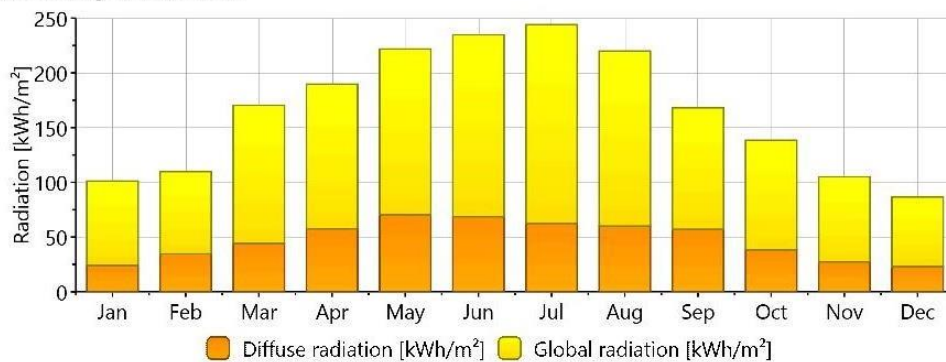
Radiation interpolation locations: Satellite data

Month	H_Gh	H_Dh	H_Bn	Ta
	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[°C]
January	101	24	183	9.9
February	110	35	149	12.1
March	170	44	209	16.7
April	190	58	204	20.2
May	222	70	218	25.7
June	235	69	233	31.6
July	244	63	254	35.0
August	220	60	231	33.8
September	168	57	176	27.3
October	138	38	186	22.4
November	105	27	167	15.0
December	87	23	161	11.0
Year	1987	568	2372	21.7

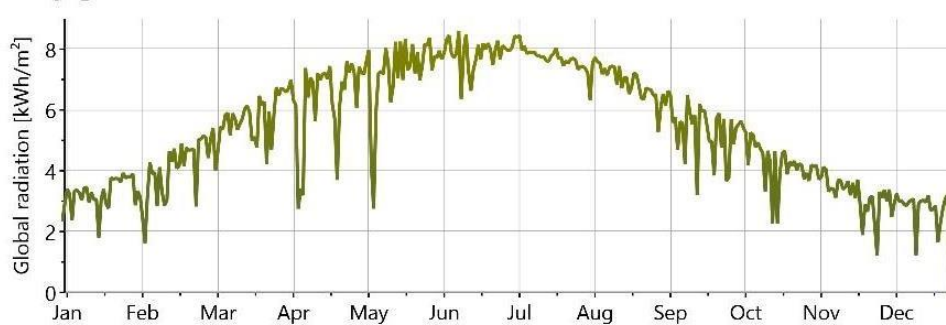
H_Gh: Irradiation of global radiation horizontal
H_Dh: Irradiation of diffuse radiation horizontal
H_Bn: Irradiation of beam
Ta: Air temperature



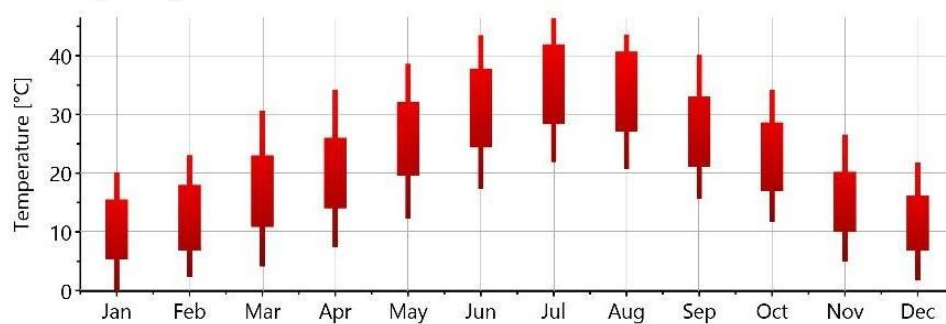
Monthly radiation



Daily global radiation

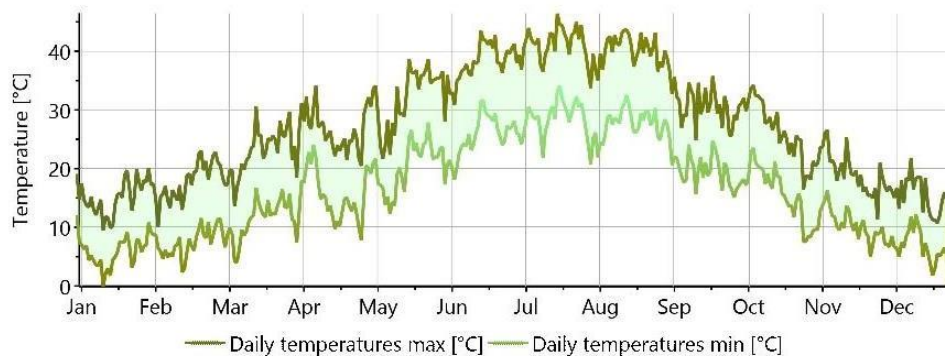


Monthly temperature

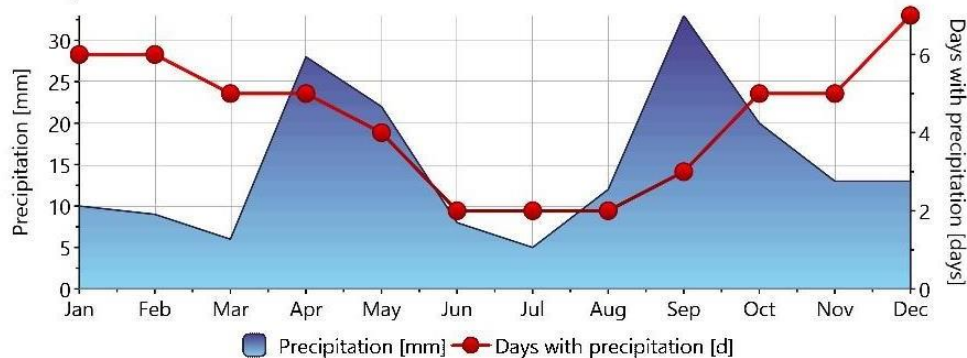


meteonorm V7.1.3.19872

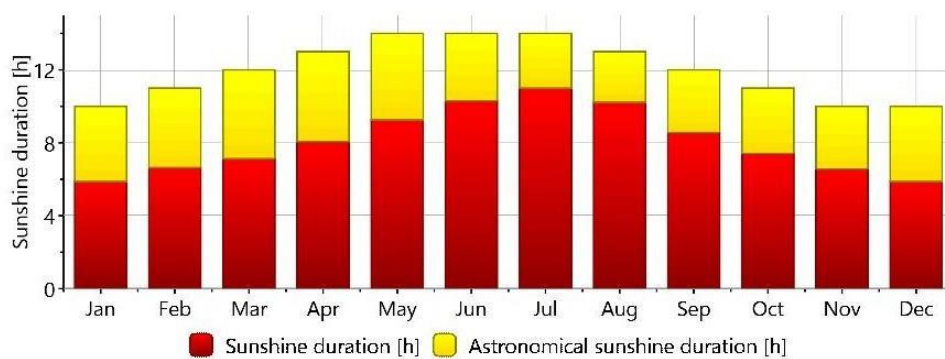
Daily temperature



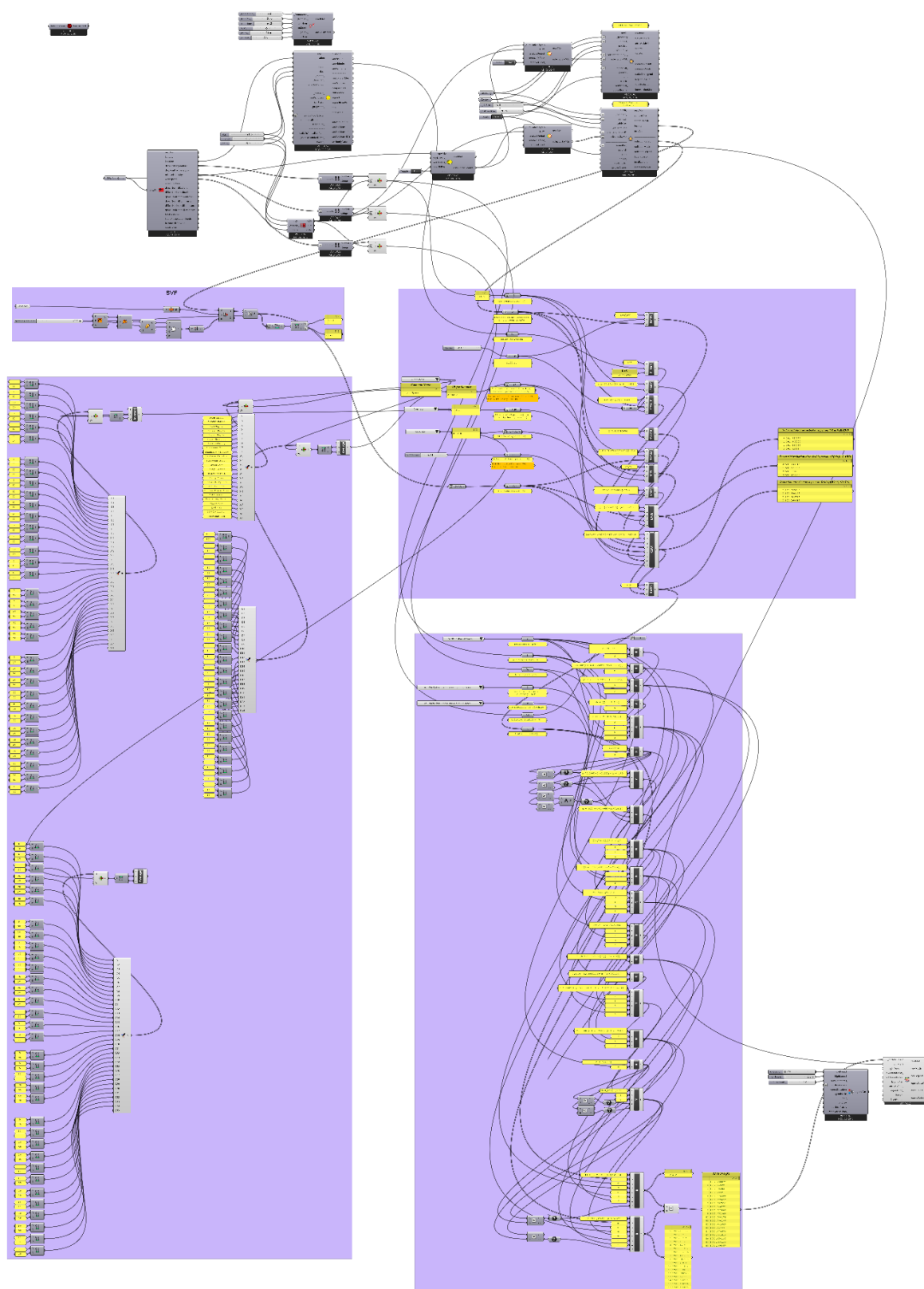
Precipitation



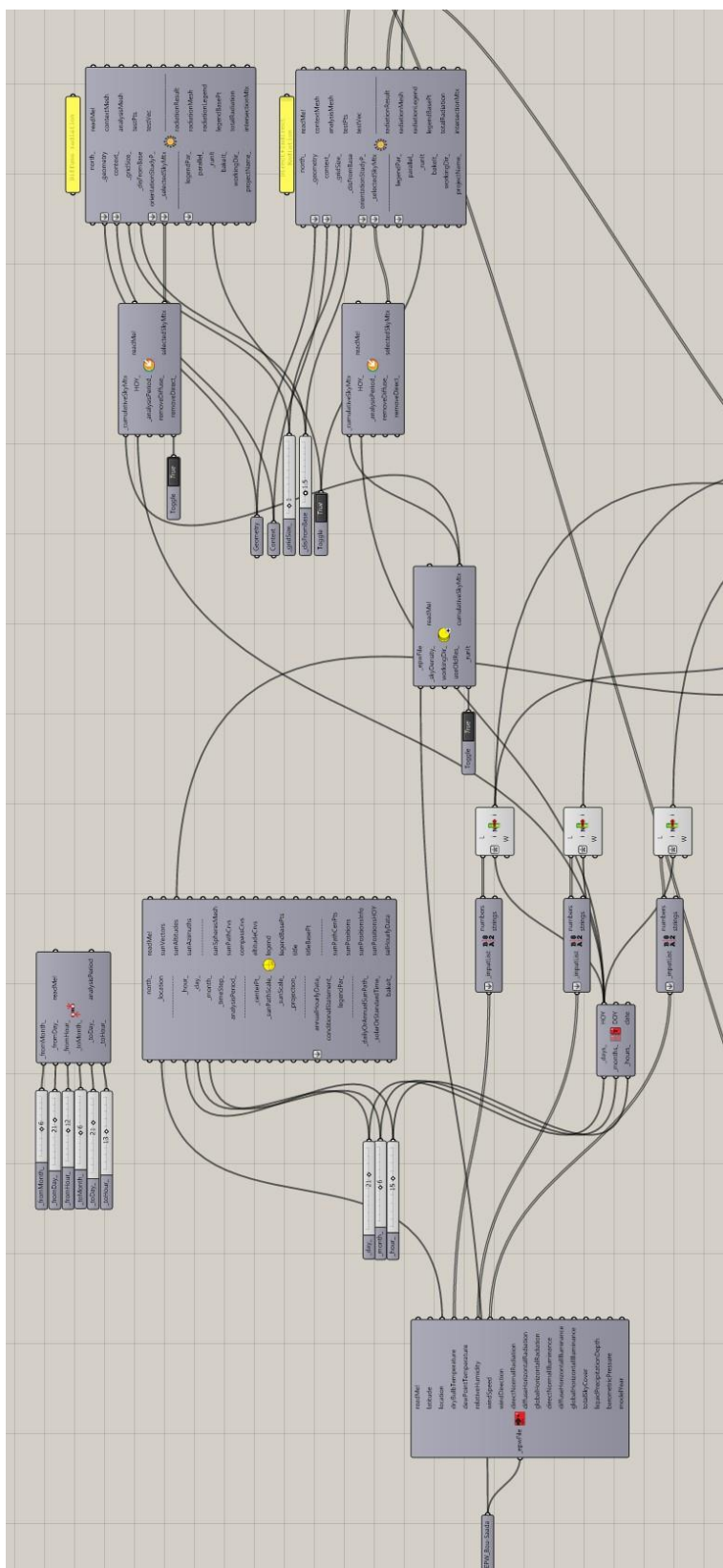
Sunshine duration



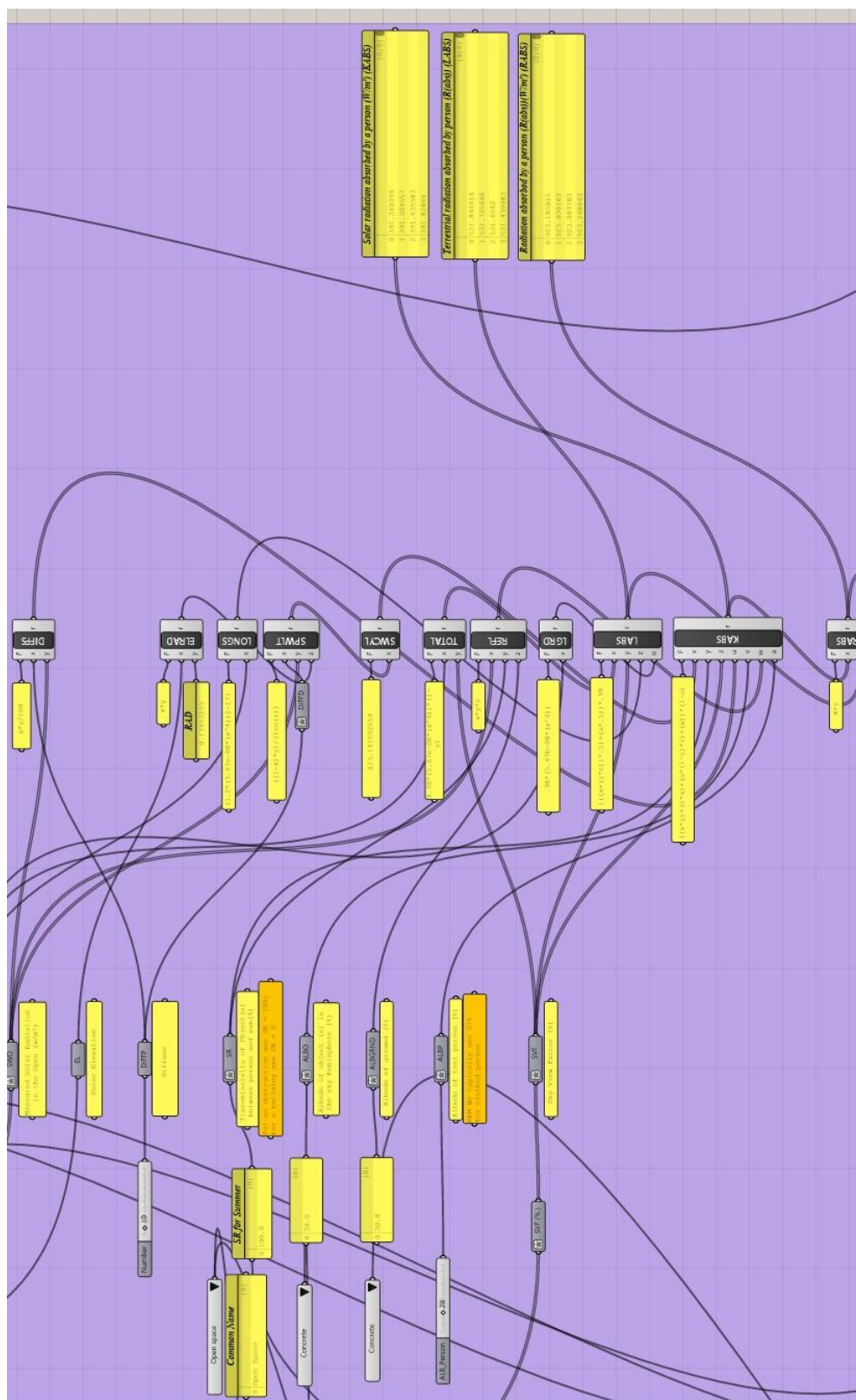
meteonorm V7.1.3.19872



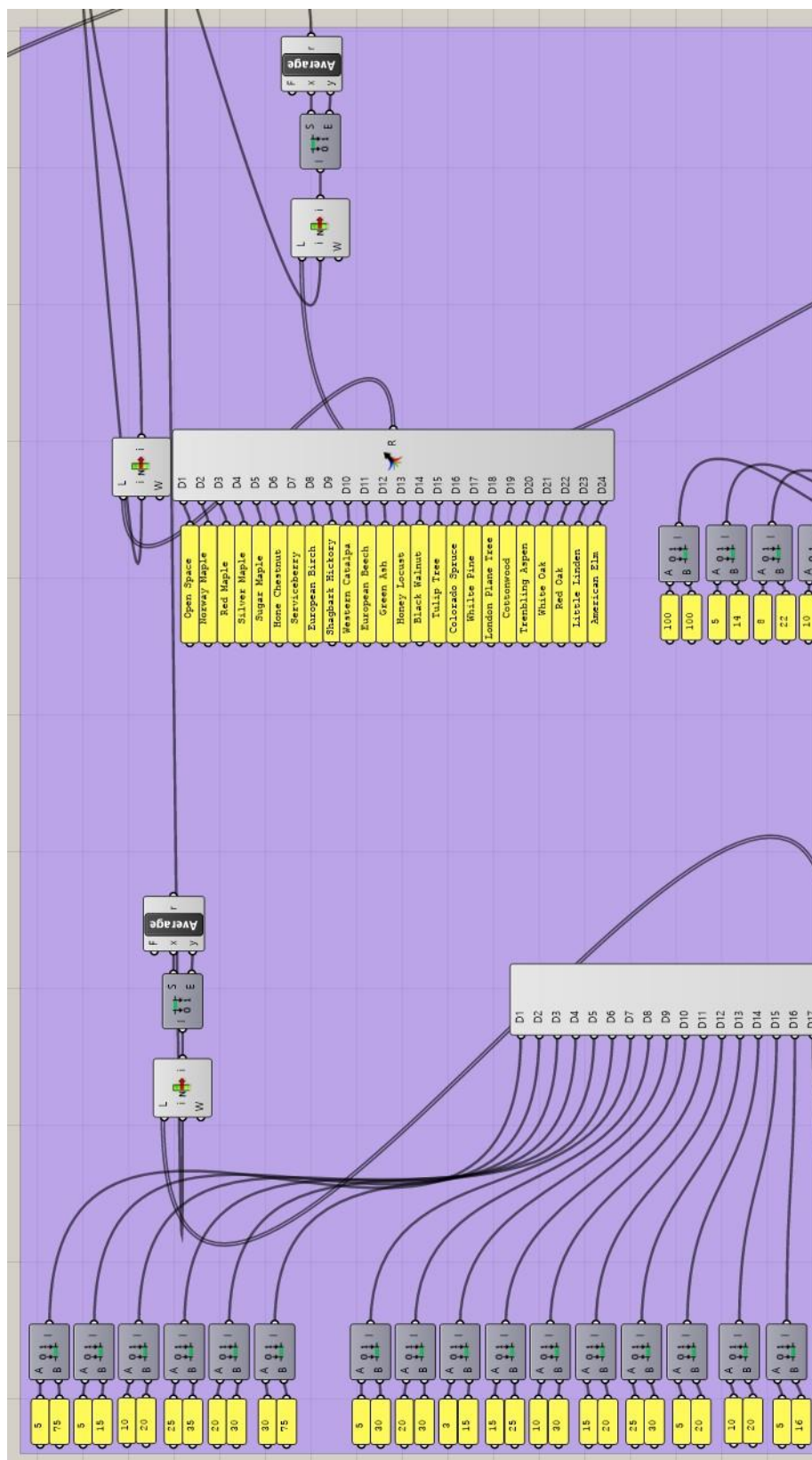
1 : Vue globale de l'algorithme de calcul de COMFA



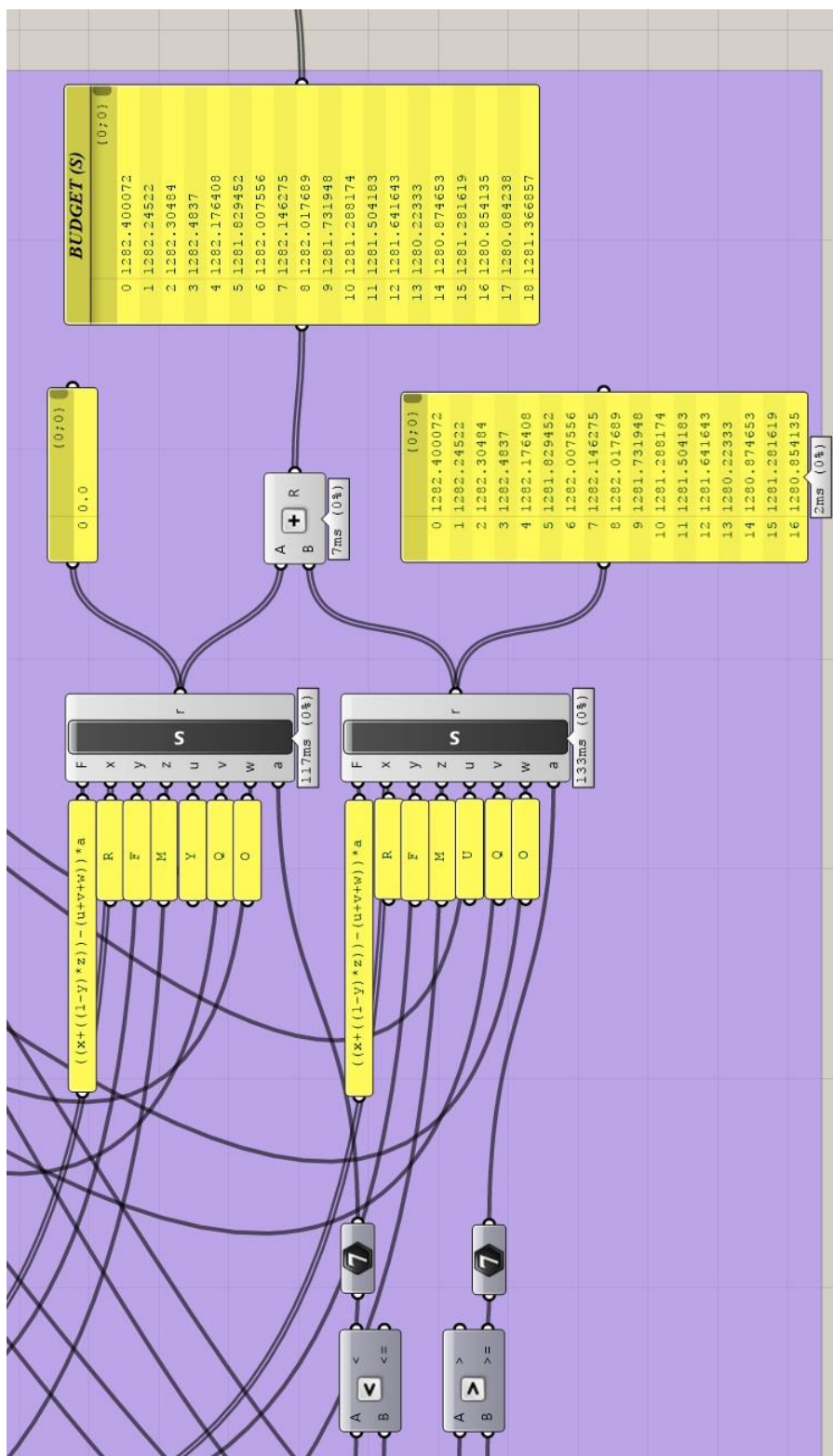
2 : Module d'extraction des données climatique de fichier (.EPW)



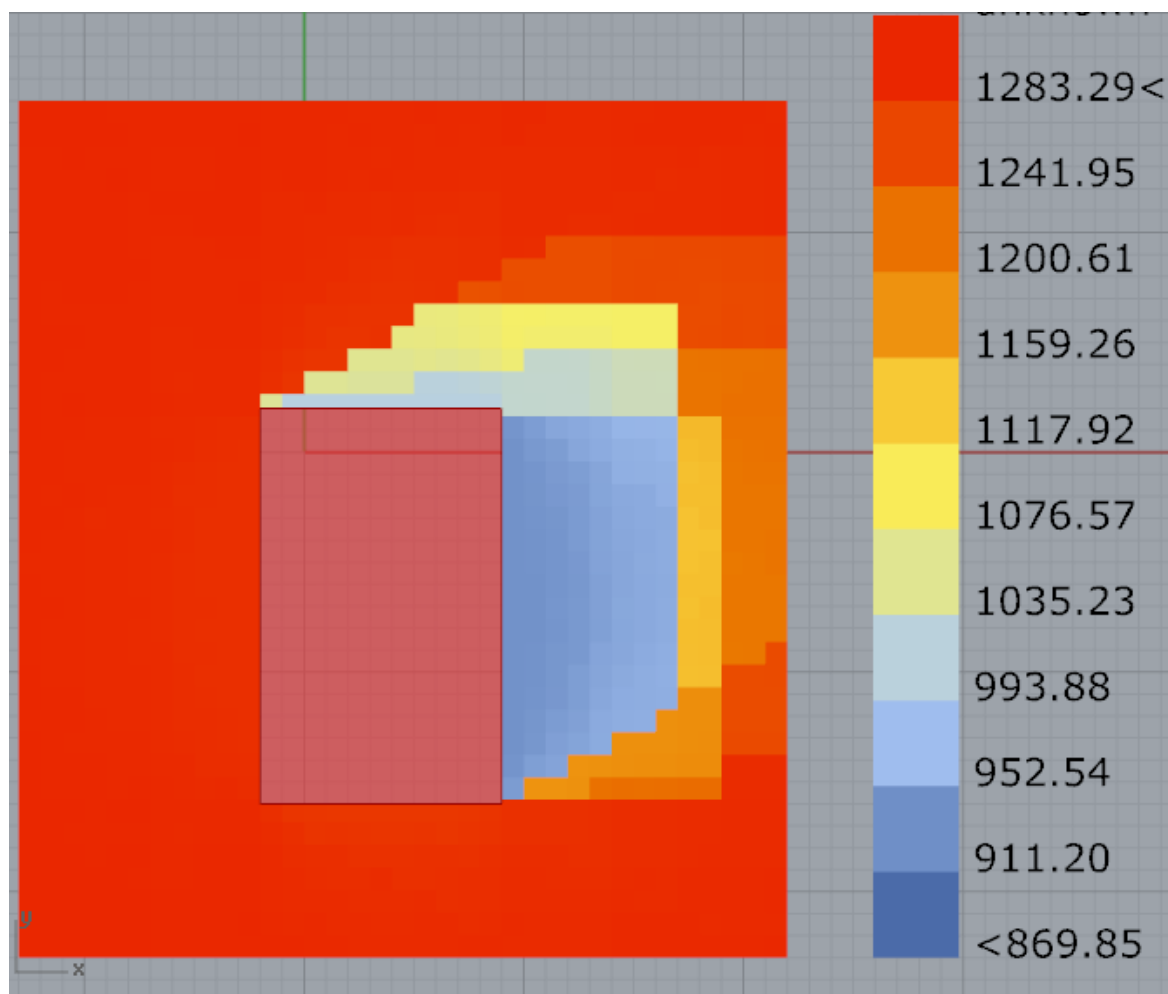
3 : Module de simulation COMFA



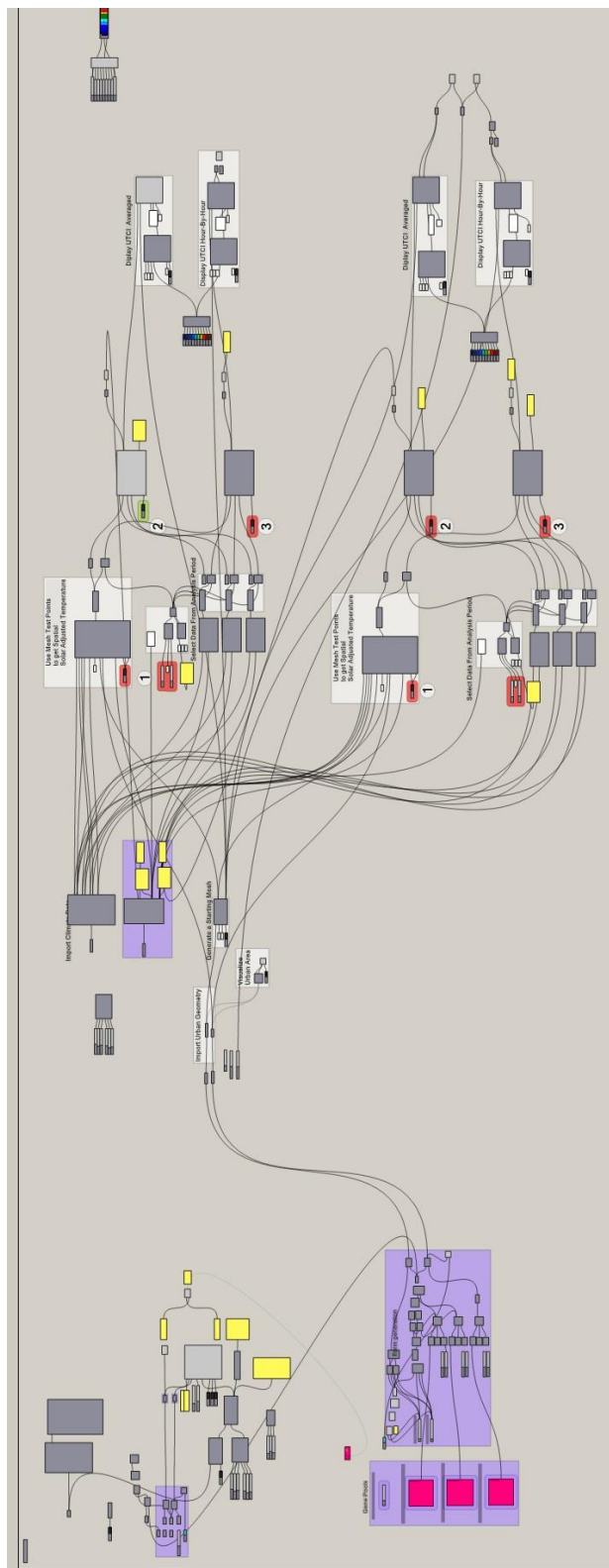
4 : Module de bibliothèque des espèces d'arbres (COMFA)



5 : Calcul de Budget énergétique (COMFA)



6 : Distribution spatiale de niveau de confort autour d'un bloc (COMFA)



7 : Vue globale sur l'algorithme de génération d'une grille régulière optimisée en utilisant Galapagos évaluée par le calcul de l'UTCI pour la période froide et chaude

Abstract

The world is changing. Temperatures are rising and becoming extreme and unpredictable. Technologies becoming smarter. Computers are playing an increasingly important role in every aspect of our lives. Architecture is no exception, every day the introduction of new technologies helps professionals (architects and urban planning designers) to solve our problems and ease our life. This research aims to explore the possibilities and limits of parametric design as a tool to optimize thermal comfort in urban areas. We made several experiments with the visual programming software grasshopper (Plugin of the CAD software **Rhinoceros**). We chose Bou Saâda city, characterized by a semi-arid climate and located 245 km south of the Algerian capital, Algiers. Through our readings, we found that urban morphology and vegetation have a considerable impact on urban microclimate. In this work, we have only explored, urban form part. We wrote several algorithms exploring different aspects of urban design and comfort each time. Because comfort is subjective, then we explored different approaches to quantify this sensation. We concluded that the Universal thermal comfort Index (**UTCI**) is the most accurate index, because it gives the real sensation of temperature. Therefore, we chosen solar radiation as an evaluation parameter because it is more significant related to outdoor thermal comfort and needs less calculation. Secondly, this research aims to define the generation and automation of the building form (Length, width, height, of the blocks and street width) in order to ensure a suitable urban thermal regulation with the appropriate urban building grid. The automation of form generation is the third pillar of our work because we wanted to explore the power of performance-guided form finding through computation.

Through our experiments, we found that the integration of the finding results in the urban design workflow has a major impact on urban thermal regulation of newly designed urban areas. The proposed methodology provides an exploration and investigation platform for architects and urban designers.

Keyword: Parametric design, Thermal comfort, urban thermal regulation, Form finding, Performative design, evolutionary design.

ملخص:

العالم في تغير مستمر. درجات الحرارة تعرف ارتفاعا غير مسبوق وغير متوقع. التكنولوجيا تتقدم بسرعة. الحاسوب يلعب دورا كبيرا في كل جوانب الحياة. العمارة ليست استثناء. كل يوم تتطور التكنولوجيا لمساعدة المحترفين (المعماريين العمرانيين) لحل وتسهيل مشاكل الحياة. يهدف هذا البحث لاستكشاف إمكانيات وحدود التصميم البارامتري (Parametric Design) كأداة لتحسين الراحة الحرارية في الفضاءات العامة. قمنا بعدة تجارب في برنامج البرمجة المرئية المسمى Grasshopper (عبارة عن إضافة في برنامج الرسم المدعم بالحاسوب، المسمى Rhinoceros). اخترنا مدينة بوسعادة ذات المناخ شبه الجاف والتي تقع على مسافة 245 كم جنوب العاصمة الجزائر. من خلال قراءتنا وجدنا أن المناخ العمراني يتأثر بالشكل العمراني والغطاء النباتي. في هذا العمل، اكتفينا بدراسة الجزئية المتعلقة بالشكل العمراني. كتبنا عدة خوارزميات لاستكشاف الجوانب المختلفة للتصميم العمراني والراحة في كل تجربة على حدة. لأن الراحة إحساس شخصي يختلف من شخص لآخر، بحثنا في النهج المتعددة لتمثيله بشكل كمي. وجدنا أن مؤشر الراحة الحرارية الشامل (UTCI) هو الأدق لأنه يعبر عن درجة الإحساس الحقيقي بالحرارة، لكن حسابه يتطلب وقتا طويلا. لذا استعملنا الإشعاع الشمسي لتوجيه البحث التشكيلي (Form Finding) لأنه يعبر عن الراحة الحرارية وحسابه يتطلب وقتا أقل. ثانيا، يهدف هذا البحث لإيجاد طريقة لتوليد الشكل العمراني والتحكم بشكل تلقائي في اعداداته (مثل: طول وعرض وارتفاع الكتل وعرض الشارع). لذلك اخترنا تلك الاحتمالات ووجدنا أن الشكل المنتظم هو الأنسب لتمكيننا من استكشاف بدائل تصميمية كما أنه أسرع من ناحية الحسابات والمحاكاة. التوليد التلقائي للشكل العمراني هو العمود الثالث لعملنا هذا لان هدفنا هو استكشاف قدرات البحث التشكيلي الموجه بالأداء، عبر الحاسوب.

من خلال تجاربنا، وجدنا أن دمج هذه المنهجية في التصميم العمراني قادر على التأثير بقوة على الراحة الحرارية في المساحات الخارجية في طور التصميم. المنهجية المقترحة توفر منصة للاستكشاف والتحري للمعماريين والعمرانيين.

كلمات مفتاحية: تصميم بارامتري، راحة حرارية في الخارج، البحث التشكيلي، التصميمي الأداي.

التصميم التطوري



Nom et Prénom : Mohammed LAMINE

Titre : Design paramétrique : Outil d'amélioration du confort thermique extérieur en climat aride
Mémoire en vue de l'Obtention du Diplôme de Magistère en
Architecture Bioclimatique

Résumé

Le monde est en mutation perpétuelle. Les températures augmentent et deviennent de façon significative extrême et intenable. Pareillement, les technologies évoluent et l'ordinateur joue un rôle fondamental dans tous aspects de notre quotidien. L'architecture ne fait pas l'exception, de nouvelles technologies y sont régulièrement introduites pour assister les professionnels (architectes et urbanistes) à résoudre des problèmes et faciliter la vie.

L'objectif de cette recherche est d'explorer les possibilités et limites du design paramétrique comme outil d'optimisation du confort thermique dans les espaces urbains. Plusieurs essais ont été expérimentés à l'aide de Grasshopper (plugin du logiciel CAO, Rhinoceros). A cet effet, nous avons choisi la ville de Bou Saâda caractérisée par un climat semi-aride, située au Sud de l'Algérie. Basé sur un état de l'art, nos lectures confirment que le microclimat urbain est amplement influencé par la végétation et la morphologie urbaine. Dans ce travail, nos investigations se limitent à la forme urbaine. Pour ce faire, nous avons conçu plusieurs algorithmes afin d'explorer, à chaque fois, un des différents aspects du design urbain en rapport au confort thermique. Vu que ce dernier est subjectif, nous avons essayé de chercher les différentes approches pour quantifier sa perception. Pour cette recherche, le calcul des indices de confort est déterminant. Le défi majeur à relever, est de trouver l'indice le plus adéquat pour ce processus, cet indice doit être suffisamment précis et relativement rapide à calculer. En premier lieu, nous avons trouvé que le « Universal thermal comfort index » (UTCI) est le plus représentatif du confort puisqu'il nous donne la perception réelle de la température. Mais on a choisi le rayonnement solaire comme paramètre d'évaluation car en plus d'être représentatif du confort, il demande moins de temps pour le calculer. En second lieu, la génération de la forme et l'automatisation de ces paramètres (longueur, largeur et hauteur des blocks ainsi que la largeur de la voie) sont très importants mais il s'avère que, l'expérimentation demande trop de temps. Finalement, et après plusieurs essais (scénarios) nous avons trouvé la grille régulière comme la plus optimisée pour explorer une multitude d'alternative du design par des calculs plus faciles.

Nos expérimentations, nous révèlent que l'intégration de ce processus dans les étapes du design urbain aura un impact considérable sur le confort urbain dans les nouveaux projets à concevoir. La méthodologie proposée représente une plateforme d'exploration et d'investigation pour les architectes et les urbanistes.

Mots clés : Design paramétrique, confort thermique, forme recherchée, performance et design.

Directeur du mémoire : Fatiha BOURBIA – Université Constantine 3

Année Universitaire : 2020-2021