

MÉCANISMES DISCRETS DE LA FABRIQUE URBAINE A TOKYO

VERS DES RÉGULATIONS D'OMBRE FAVORISANT LA
MIXITÉ FONCTIONNELLE DANS LES QUARTIERS URBAINS
TOKYOITES

Mémoire de Master

Séminaire : SAPI

ENSAPLV

Encadrants : Joaquim Silvestre et Anne Tüscher

Mots-clés : Optimisation architecturale, Régulations urbaines,
Simulation d'ombre portée, Mixité urbaine, Indice de Shannon

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur Joaquim Silvestre et Madame Anne Tüscher pour leur écoute, leur accompagnement soutenu tout au long de mes trois semestres de recherches et pendant la rédaction de ce mémoire de master.

Je les remercie en particulier de m'avoir guidée dans le choix du sujet. Leur enseignement m'a aussi permis d'acquérir les apports théoriques indispensables à mes recherches et la méthodologie nécessaire à la rédaction de ce document.

Je souhaiterais aussi remercier l'ensemble de mes camarades de classe, pour les échanges très constructifs que nous avons eus et l'attention portée à mon travail.

RESUMÉ

Dans les grandes métropoles, certaines régulations sont mises en place afin de garantir une morphologie urbaine cohérente et un accès à la lumière naturelle. A Tokyo, ces règles sont particulièrement importantes car, à chaque zone urbaine définie, est associé un temps maximal d'ombre autorisé par bâtiment. Ces réglementations historiques sont aujourd'hui confrontées à de nouvelles ambitions urbaines telles que l'amélioration de la mixité fonctionnelle. Cette recherche interroge la capacité des réglementations d'ombre à répondre à ces nouveaux objectifs urbains.

En s'appuyant sur une approche d'optimisation computationnelle, cette recherche développe un modèle paramétrique simulant un quartier tokyoïte et ses réglementations en vigueur. Le quartier d'Harajuku est choisi comme site d'étude pour sa multitude de règles et sa densification déjà importante.

Après une évaluation des réglementations existantes, plusieurs scénarii de règles alternatives sont testés, comparés à l'existant et évalués à l'aide de l'indice de mixité de Shannon.

Les résultats montrent les limites des règles actuelles en termes de mixité urbaine. Ils soulignent la nécessité de concevoir des règles urbaines plus robustes pour orienter la morphologie urbaine et sa transformation à moyen et long termes dans un contexte de transition écologique.

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|----|
| REMERCIEMENTS | 0 |
| RESUME | 0 |
| 1 - INTRODUCTION | 2 |
| 1.1 Cadre scientifique | 2 |
| 1.2 Problématique | 4 |
| 1.3 Hypothèses..... | 5 |
| 1.4 Méthode de recherche générale | 6 |
| 2 – ETAT DE L’ART | 7 |
| 2.1 Design computationnel | 7 |
| 2.2 Approche paramétrique en architecture | 9 |
| 2.3 Optimisation computationnelle..... | 11 |
| 2.4 Algorithmes génétiques | 13 |
| 2.5 Outils..... | 15 |
| 2.6 Application à l’échelle urbaine | 17 |
| 2.7 Situation solaire à Tokyo | 18 |
| 2.8 Contexte des règles d’ombre | 19 |
| 2.9 Applications usuelles | 21 |
| 2.10 Discussions | 23 |
| 3 – METHODOLOGIE DETAILLEE ... | 24 |
| 3.1 Introduction générale | 24 |
| 3.2 Définition du site d’étude | 26 |
| 3.3 Encodage des règles d’ombre | 27 |
| 3.4 Développement du modèle paramétrique..... | 28 |
| 3.5 Simulation héliodonnale | 29 |
| 3.6 Optimisation | 30 |
| 3.7 Validation et interprétation..... | 31 |
| 4 - EXPERIENCES | 32 |
| 4.1 Préparation | 32 |
| 4.2 Simulation des règles actuelles | 34 |
| 4.2.1 Modélisation du site..... | 34 |
| 4.2.2 Mise en place des règles d’ombre | 36 |
| 4.2.3 Indice de Shannon..... | 39 |
| 4.2.4 Evaluation des règles actuelles | 41 |
| 4.3 Test de règles alternatives | 42 |
| 4.3.1 Définition des scenarii | 42 |
| 4.3.1 Evaluation des scenarii | 44 |
| 5 – PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS | 48 |
| 5.1 Synthèse des scenarii et de leur évaluation | 48 |
| 5.2 Conclusion sur l’énoncé d’une réglementation efficace | 49 |
| 5.3 Application possible à d’autres métropoles | 50 |
| REFERENCES | 51 |

1-INTRODUCTION

1.1. CADRE SCIENTIFIQUE

L'ensoleillement est une question de santé publique pour les grandes métropoles. Nombre d'entre elles ont donc au minimum mis en place des réglementations sur les hauteurs maximales de bâtiments autorisées. Ces règles permettent de garantir à la fois le confort des usagers et leur accès à la lumière naturelle. Elles sont, dans la majorité des cas, associées au programme de l'édifice.

Toutefois, l'évolution des recommandations urbaines questionne ces cadres réglementaires existants. Le concept de la « ville du quart d'heure », popularisé par Carlos Moreno, promeut une organisation urbaine où les usages quotidiens sont regroupés spatialement. Le logement, le lieu de travail, les commerces, les loisirs et les services utilisés par un individu seraient idéalement situés à moins de 15 minutes les uns des autres. Cette approche repose sur une densification et une diversification d'usages des quartiers. Or, les règlements urbains actuels sont souvent associés à la séparation fonctionnelle (zoning) des quartiers.

Dans ce cadre, la capacité des réglementations urbaines à accompagner les évolutions de nos grandes métropoles semble limitée. En effet, elles tendent à produire des conflits entre des morphologies peu flexibles et des programmes qui peinent à s'y loger.

La métropole de Tokyo, avec ses plus de 14 millions d'habitants et sa superficie de plus de 2000 kilomètres carrés est confrontée à cette tension entre la volonté de densification et le maintien de la qualité de vie de ses habitants. Ce dilemme s'est traduit dans ses règlements d'urbanisme par l'obligation de garantir un ensoleillement minimum à chaque édifice.

La réglementation d'ombre tokyoïte « hikage kisei » 日影規制 [« Building Standard Law », 1976] joue un rôle clé pour tout architecte intervenant sur le territoire. Elle régule l'ombre portée lors du solstice d'hiver des bâtiments, selon trois catégories de zone principales : résidentielle, commerciale et industrielle.

Elle impose une durée maximale (en heures) pendant laquelle une zone située en dehors de la parcelle peut être privée de lumière naturelle. Les deux zones régulées sont la zone à 5 mètres de la limite parcellaire et la zone à 10 mètres de la limite parcellaire (Figure 1). Une particularité est que l'ombre portée est calculée à la hauteur moyenne du niveau du sol (Figure 2). Ceci s'applique notamment lorsque le terrain est en pente, où un niveau fictif moyen sert de base au calcul.

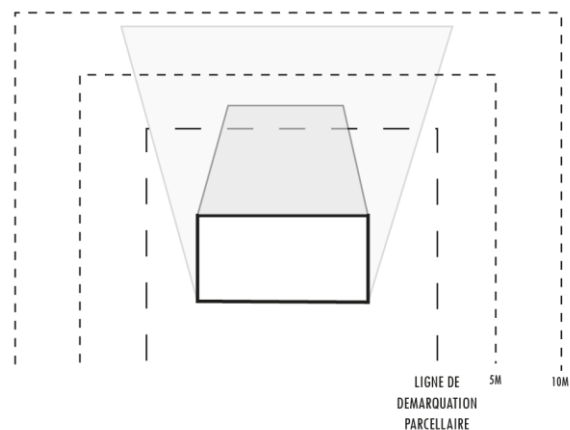


Figure-1: Règlement d'ombre tokyoïte plan [illustration propre]

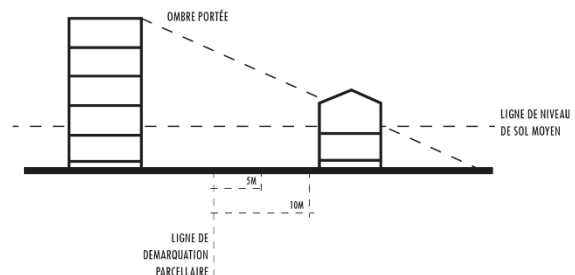


Figure-2: Règlement d'ombre tokyoïte coupe [illustration propre]

Cette réglementation a de fortes répercussions morphologiques, en particulier dans les quartiers résidentiels avec des parcelles étroites. Nous pouvons ainsi observer des configurations architecturales en réponse à ces règles : des retraits, des toitures en gradin ou avec des pentes atypiques (*Figure 3*).

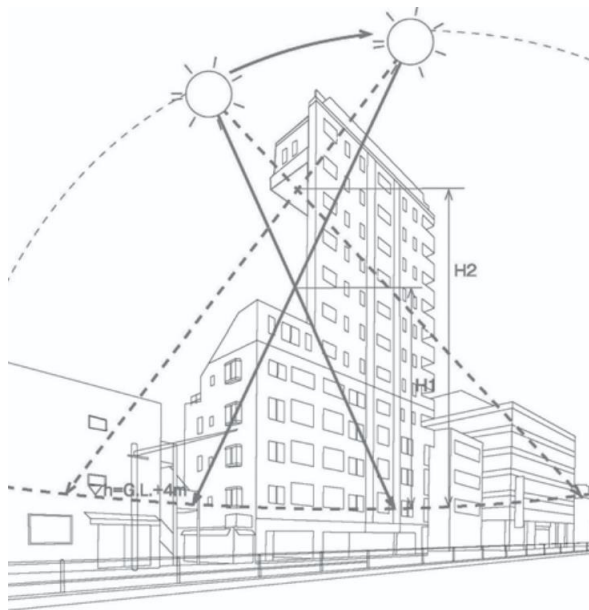


Figure-3: Decoding the effects of Nichi-Ei regulations
[Yasutaka Yoshimura]

Dans les grandes métropoles, la mixité d'usage étant de plus en plus encouragée, les cadres réglementaires stricts peuvent entraver ce type de renouvellement urbain, car, ils privilégient plutôt une homogénéité d'usage au sein d'un édifice. Des contraintes environnementales générales et imposées peuvent figer la morphologie urbaine plutôt que de proposer des aménagements adaptés à la situation [Perini et Magliocco, 2014].

Les outils de conception paramétriques tels que Rhinocéros (Robert McNeel & Associates) et son application logicielle d'algorithmique graphique Grasshopper permettent aujourd'hui de modéliser précisément des contraintes physiques et

réglementaires existantes. En ajoutant certains plugins, il est possible de compléter la modélisation avec des données supplémentaires d'analyse et d'optimiser un paramètre défini selon un ou plusieurs critères. En effet, Ladybug permet de faire des analyses solaires détaillées et Galapagos sert à faire de l'optimisation monocritère.

Ladybug permet d'intégrer des données climatiques (sous forme de fichiers EPW) pour créer des simulations énergétiques avancées. Il est capable de calculer, par exemple, la quantité de lumière reçue par une surface tout au long de l'année. Ce plugin est utile pour une analyse complète et détaillée des ombres portées dans un quartier.

Galapagos est un composant d'optimisation intégré à Grasshopper. Il permet de créer des configurations urbaines optimales un critère.

Ces outils ont déjà été utilisés à l'échelle urbaine lors d'études de génération de diverses configurations de fabriques urbaines en fonction de la densité de population, de l'ensoleillement, des services souhaités et du contexte actuel (routes, bâtiments, ...) [Sun et Dogan, 2022]. Ils ont aussi été utilisés à l'échelle du bâtiment pour en optimiser sa forme en fonction de plusieurs critères de consommation énergétique [Ciardiello et al. 2020].

1.2. PROBLÉMATIQUE

Ce mémoire propose de contribuer à une réflexion sur l'évolution des réglementations urbaines à l'aide d'outils paramétriques.

L'objectif est d'évaluer la capacité du cadre normatif à accompagner, plutôt qu'entraver la transformation urbaine pour favoriser les quartiers à usages mixtes.

Peu d'études ont été réalisées en intégrant les réglementations d'ombre dans la ville de Tokyo. De plus, ces réglementations sont peu considérées comme un critère dynamique. Or, penser l'adaptabilité des réglementations d'ombre peut avoir de fortes conséquences sur les morphologies urbaines, les usages et plus généralement le développement à long terme de la ville.

Cette recherche propose donc de considérer les régulations d'ombre comme un paramètre dynamique et conditionnel. Certaines régulations déjà en place permettent de déroger à des limites de hauteur imposées en compensant par des espaces ouverts au public plus importants (« sogosekkei », 総合設計). L'objectif de cette recherche est plutôt de repenser les règles en soit et d'en évaluer leurs performances. Il s'agirait donc non plus de déroger à la règle mais d'adapter la règle à l'évolution de la ville.

La réglementation actuelle souffre de plusieurs limites. Elle est peu adaptée au contexte, puisqu'elle ne prend en compte que l'usage de la zone. Elle considère donc peu le contexte urbain et la configuration parcellaire. De plus, elle favorise peu la densification de par les retraits et les contraintes de hauteur imposées. Or, les quartiers mixtes dynamiques sont souvent plutôt denses.

Ce mémoire propose de prendre comme cas d'étude le quartier d'Harajuku. Il est intéressant de part sa diversité : il contient de grandes artères commerciales accueillant environ 110 000 personnes par jour et des ruelles résidentielles beaucoup moins denses. Il s'agit d'un quartier de plus en plus soumis à la pression foncière et qui pousse donc à une diversification des usages au sein même des édifices. Les réglementations d'ombre y sont donc particulièrement en tension avec le renouvellement urbain constant.

La problématique est donc la suivante : dans quelle mesure la réglementation d'ombre actuelle à Tokyo entrave-t-elle la réalisation de quartiers à usages mixtes ? L'élaboration de nouvelles règles d'ombre, appliquées au quartier d'Harajuku, peut-elle devenir un levier pour renforcer la mixité urbaine ?

1.3. HYPOTHÈSES

Une des hypothèses de ce mémoire est la suivante : pour obtenir des morphologies de bâtiments plus performantes, il convient de se fonder sur la mixité des usages au sein du programme de l'édifice.

En effet, chaque usage a un besoin solaire différent. Nous pouvons supposer que des commerces ont un besoin d'apport solaire plus faible que des logements. Les deux peuvent donc se compléter et s'articuler.

Par ailleurs, ces nouvelles règles d'ensoleillement ne doivent pas compromettre d'autres aspects du développement urbain. Il s'agit donc d'obtenir une meilleure mixité programmatique en gardant sensiblement le volume bâti actuel.

1.4. MÉTHODE DE RECHERCHE GÉNÉRALE

Pour répondre à cette problématique, nous procéderons d'abord à une analyse du site choisi. Il s'agit d'en comprendre les typologies urbaines, les enjeux, les tensions et les réglementations associées.

La modélisation paramétrique sera ensuite mise en place. Il s'agit à la fois de modéliser les volumes bâtis actuels et paramétrer les réglementations actuelles. Ce travail sera réalisé grâce à Rhinocéros, Grasshopper et Ladybug.

Plusieurs scénarii seront ensuite testés. Ils comporteront des régulations basées sur la proportion d'usages de l'édifice. L'outil Ladybug permettra alors de quantifier l'ensoleillement et l'outil Galapagos de maximiser le volume utile de l'édifice tout en respectant l'ensoleillement voulu.

Les différents scénarii seront ensuite évalués selon les critères suivants :

- Volume utile total
- Taux de mixité apporté

2-ETAT DE L'ART

2.1. DESIGN COMPUTATIONNEL

L'arrivée d'outils informatiques au service des architectes a révolutionnée la discipline. On parle aujourd'hui d'un « tournant computationnel » ou « tournant numérique » [Carpo, 2013]

Les premiers essais de « design computationnel » datent des années 1960 avec des réalisations comme CRAFT (Computerized Relative Allocation of Facilities Technique) [Armour & Buffa, 1963]. Il s'agit d'un algorithme permettant d'améliorer la disposition d'éléments afin de faciliter les flux entre ces derniers. Toutefois, deux éléments ne peuvent être échangés que s'ils ont la même superficie ou s'ils sont adjacents. La solution finale est donc très largement déterminée par la disposition initiale. L'algorithme donne des résultats en 2D pouvant s'apparenter à la *Figure 4*. CRAFT reste, pour autant, l'un des premiers à proposer une forme d'automatisation du design et d'optimisation.

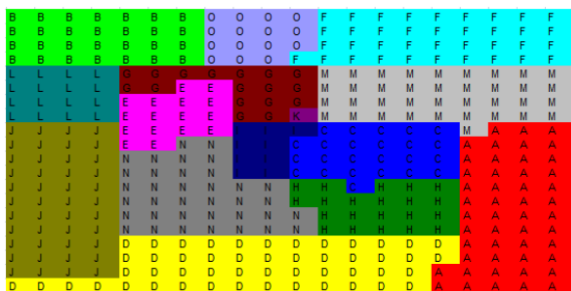


Figure-4: Résultat type de CRAFT [Sanli, 2010]

Il ne s'agit toutefois pas d'une interface graphique telle que ce que nous avons aujourd'hui. Ses origines remontent plutôt à « Sketchpad » d'Ivan Sutherland en 1963. Ce programme est considéré comme l'ancêtre du CAD (Computer-Aided Design) actuel. Il permettait le dessin graphique directement sur l'interface, comme visible sur la *Figure 5*. Le

programme créait des relations paramétriques entre les différents éléments dessinés. Ainsi, la modification d'un objet entraînait automatiquement la modification de toutes ses instances.



Figure-5: Ivan Sutherland utilisant le Sketchpad system [Ivan Sutherland, *Electronic edition of Sutherland's Sketchpad dissertation*, édité par Blackwell & Rodden]

Un deuxième ancêtre du CAD actuel est le système DAC-1 (Design Augmented by Computer) développé en 1964 par General Motors et IBM (International Business Machines Corporation). Il permettait à la fois de manipuler des dessins existants et de les modifier. Il était principalement utilisé dans l'industrie automobile (*Figure 6*).



Figure-6 : DAC-1 utilisé dans l'industrie automobile

Tous ces outils ont commencé à être commercialisés au début des années 1980. Au même moment, sont aussi apparus des outils de simulation de performances des bâtiments.

Ce « tournant computationnel » a aussi été encouragé par un nombre croissant d'évènements, de conférences et de revues de presse qui se sont emparés du sujet. On peut citer parmi elles « The Conference on Design Methods », à Londres en 1962, qui a sensibilisé les architectes au développement des outils informatiques applicables à leur secteur d'activité. Le rapport de conférence publié la même année "The Design Methods: The Theory and Practice of Design" [Jones, 1962] a participé à l'expansion de ce mouvement.

C'est toutefois lors des 20 dernières années que nous avons pu observer un intérêt grandissant pour ces outils (Figure 7). Nous pouvons donc penser que ces sujets continueront à être au cœur des débats des prochaines décennies.

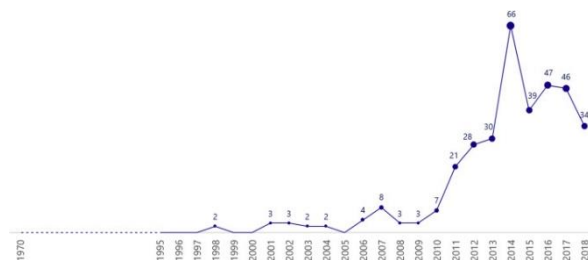


Figure-7 : Utilisation du terme « Computational Design » au fil du temps : chronologie indiquant le nombre d'occurrences du terme « Design Computationnel » dans la littérature en tant que mot-clé ou sujet de recherche principal. [Caetano, 2019]

En effet, cet intérêt grandissant pour le design computationnel a permis le développement de logiciels de modélisation de plus en plus performants et leur appropriation complète par les architectes et les urbanistes.

Rhinocéros et son extension paramétrique Grasshopper ont marqué un nouveau tournant dans le design computationnel. En effet, ce logiciel développé au début des années 2000, introduit une nouvelle logique aux logiciels de modélisation : une logique de programmation visuelle. Ils ont rendu accessible aux architectes la manipulation de paramètres, d'algorithmes et de données sans nécessiter des compétences en codage informatique.

2.2. APPROCHE PARAMETRIQUE EN ARCHITECTURE

L'approche paramétrique appliquée à l'architecture désigne une technique de conception architecturale. En effet, elle est définie dans l'article *Defining parametric, generative, and algorithmic design* comme un « processus de conception basé sur la pensée algorithmique et qui utilise des paramètres et des règles pour les contraindre » [Caetano, 2020]. Les objets représentés sont ainsi associés, non plus à des valeurs exactes numériques, mais à des « paramètres symboliques » qui peuvent être modifiés au cours du temps de manière directe ou indirecte.

Le terme de « conception paramétrique » a été beaucoup utilisé, notamment dans les articles scientifiques (*Figure 8*). Il est même le plus utilisé dans la famille du design computationnel (*Figure 9*).

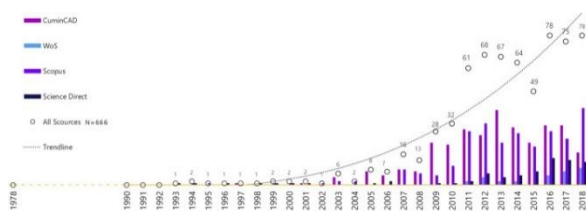


Figure-8: Fréquence d'utilisation du terme « conception paramétrique » comme mot-clé dans les différentes bases de données scientifiques entre 1978 et 2018, [Caetano, 2020]

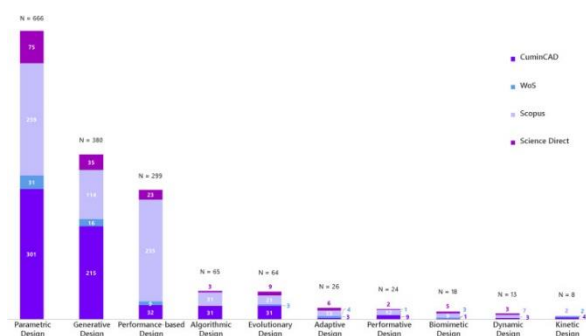


Figure-9: Nombre d'occurrences de chaque terme lié au Design Computationnel dans la littérature entre 1978 et 2018.[Caetano, 2020]

Cette approche a aussi donné lieu à son propre mouvement architectural [Youns & Grchev, 2024]. Ces auteurs distinguent le design paramétrique (« pratique de concevoir avec des paramètres modifiables : géométrie, contraintes, variables ») et le style du « parametricism ». Ce dernier est défini dans le livre *Parametricism Manifesto* de Patrik Schumacher publié en 2008.

Cet article place le « parametricism » dans la continuité du modernisme et comme une alternative ou un successeur du postmodernisme. Il arrive toutefois à se détacher de la rigidité typologique et formelle de ses prédécesseurs.

Par ailleurs, les auteurs critiquent la surreprésentation du courant « parametricism » et son implication dans de nombreux domaines : esthétique, fonction et conception (*Figure 10*).

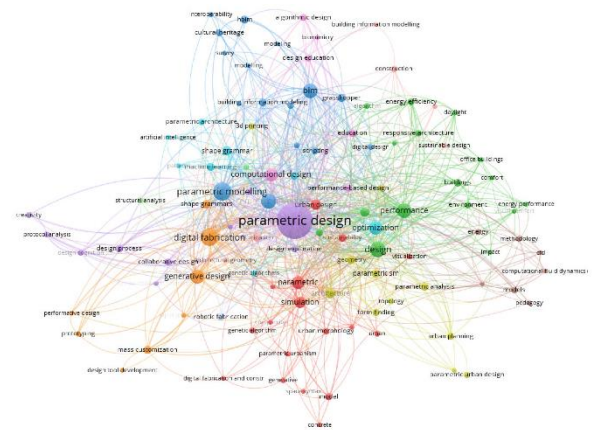


Figure-10: Cooccurrence des mots-clés « paramétrisme » et « architecture paramétrique » dans la littérature. [Youns & Grchev, 2024]

En effet, leur principale critique est liée à la dépendance technologique ainsi qu'au formalisme esthétique excessif de ce mouvement. Il implique aussi un niveau de complexité supplémentaire lors de la construction. Enfin, les ouvrages de ce style semblent plutôt déconnectés de leur contexte d'après les auteurs.

Ils lui reconnaissent toutefois une innovation formelle ainsi qu'une grande amélioration des performances grâce à toutes les analyses que les outils mis à disposition permettent.

2.3. OPTIMISATION COMPUTATIONNELLE

Le dictionnaire Larousse définit l'optimisation comme « Donner à quelque chose, à une machine, à une entreprise, etc., l'état le plus favorable... ». C'est-à-dire, trouver les meilleures conditions d'un système à un temps t et en fonction de contraintes définies.

L'optimisation computationnelle correspond à un ensemble de méthodes utilisant des algorithmes pour maximiser une fonction objectif définie.

Ils utilisent la méthode suivante :

- Formalisation du problème : c'est-à-dire la définition claire des variables de conception, des contraintes et des objectifs. Il s'agit de savoir aussi les transcrire d'une manière compréhensible par le logiciel. Cette transcription est une partie clé du processus car elle conditionne les résultats qui suivent.
- Choix de l'algorithme d'optimisation. Il en existe de nombreux utilisés couramment (*Figure 11*)
- Traitement et évaluation des résultats. Il s'agit de remettre en question les résultats obtenus et leur cohérence. Cela peut amener à une révision de la formalisation du problème.

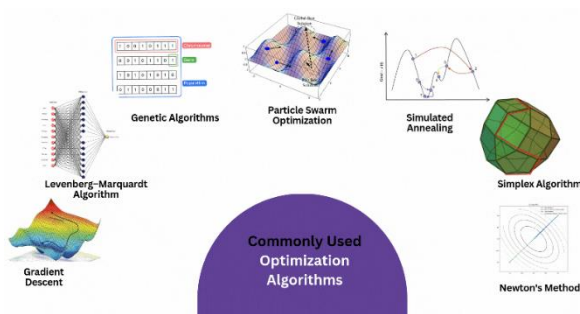


Figure-11: Algorithmes d'Optimisation courants [Tilawat, 2025]

Comme mentionné ci-dessus, il existe de nombreux types d'algorithmes d'optimisation (*Figure 12*).

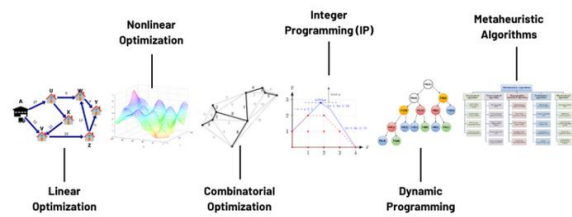


Figure-12: Principales catégories d'algorithmes d'optimisation [Tilawat, 2025]

Parmi ceux-ci, nous pouvons citer :

- L'optimisation linéaire : pour des problèmes dont les données d'entrée, les contraintes et la fonction objective sont linéaires. L'algorithme Simplex est un exemple de ce type d'optimisation [Dantzig, 1947]. Il a par exemple été déployé pour définir la production maximale d'usine en prenant en compte les ressources disponibles [Wang, 2005].
- L'optimisation non linéaire : pour des problèmes où les données d'entrée, les contraintes et la fonction objective sont non linéaires. Nous pouvons citer la méthode de Newton [Ypma, 1995] et la programmation quadratique séquentielle (SQP) [Izmailov]. Ce type d'optimisation a par exemple été utilisé pour déterminer la forme structurelle d'éléments porteurs car la résistance et la déformation dépendent de fonctions non linéaires [Bendsøe, 2003].
- L'optimisation combinatoire : pour laquelle l'ensemble des solutions sont dans un ensemble discret. On peut citer par exemple la méthode

hongroise qui utilise ce type d'optimisation.

Elle peut aussi être utilisée pour résoudre le « Traveling Salesman Problem », c'est-à-dire l'optimisation du chemin parcouru en minimisant la distance totale tout en passant par tous les endroits clé. Elle a ainsi été appliquée aux transports ou aux collectes de déchets [Ghiani, 2013].

- La programmation entière : utilisée pour obtenir des variables de décision entières. La méthode de Branch and Bound utilise ce type d'optimisation. Elle a aussi été appliquée au réseau électrique afin d'optimiser la production énergétique en fonction de la méthode et du coût de production de chacune des unités [Carrion, 2003]. Ici les variables de décision entières sont l'allumage ou non de la centrale.

- La programmation dynamique : qui permet de décomposer des problèmes complexes en sous-problèmes afin d'en faciliter la résolution. Elle est par exemple utilisée pour optimiser la température dans des bâtiments pièce par pièce. Le problème est alors subdivisé en sous problèmes de manière spatiale et temporelle [Oldewurtel, 2012].

- Les algorithmes méta heuristiques : visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficiles, non résolus par les autres méthodes citées ci-dessus. On y retrouve par exemple les algorithmes génétiques.

Ces méthodes d'optimisation computationnelle sont utilisées dans différents domaines de l'architecture.

Elles sont par exemple utilisées pour optimiser les performances énergétiques des bâtiments en fonction de leur morphologie, leur orientation solaire et la ventilation naturelle créée [Sakiyama, 2021].

De même, il est possible d'optimiser et rationaliser la structure, les façades ou les matériaux de construction en prenant en compte dans la fonction objectif le coût total de l'opération.

Certains auteurs prônent même une intégration de l'optimisation tout au long du processus de conception [Somanath, 2019]. Cela permettrait une meilleure interdisciplinarité car il intégrerait et quantifierait les contraintes de chacun des acteurs et de chacune des disciplines (*Figure 13*) à chaque étape du projet.

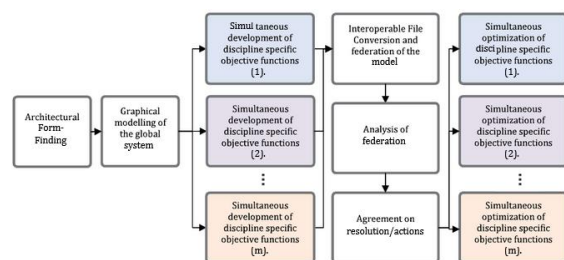


Figure-13 : Flux de travail paramétrique généralisé pour la collaboration interdisciplinaire [Somanath, 2019]

L'optimisation computationnelle a toutefois des limites, notamment dans la définition du problème. En effet, certains critères peuvent être compliqués à réduire à une formule mathématique. Dans ce cas, nous pouvons interroger la pertinence des résultats obtenus, au vu de la définition partielle du paramètre.

2.4. ALGORITHMES GENETIQUES

Les algorithmes génétiques sont une sous famille des algorithmes d'optimisation.

Ils sont basés sur la théorie de l'évolution popularisée par Darwin dans son ouvrage *L'origine des Espèces* publié en 1859. Cette théorie met en avant le processus de sélection naturelle, c'est-à-dire le fait qu'un trait plus favorable à un élément et à une période définie a plus de chance de perdurer.

La différence entre les algorithmes génétiques et ceux présentés dans la partie précédente est que les algorithmes génétiques fonctionnent avec une population de points et un codage d'ensemble de paramètres plutôt qu'avec les valeurs des paramètres elles-mêmes. [Mathew].

De plus, la transition entre les différentes étapes est liée à des probabilités plutôt qu'à des informations sur le paramètre en lui-même. Nous pouvons donc noter que cela implique une incertitude quant à la solution optimisée trouvée. En effet, il est toujours possible d'optimiser davantage, ou autrement (Figure 14).

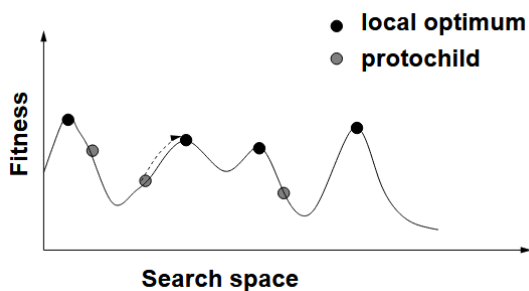


Figure-14 : Processus de recherche des algorithmes génétiques [Sun, 2025]

Le principe de fonctionnement suit les étapes ci-dessous (illustrées par la Figure 15):

- Encodage des solutions
- Initialisation de la population

- Evaluation des individus
- Sélection des parents
- Croisement
- Mutation
- Remplacement et convergence

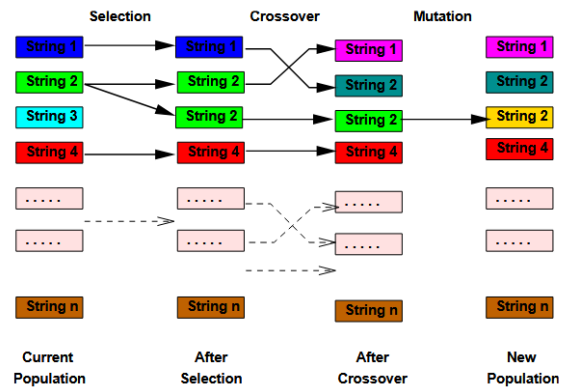


Figure-15 : Le principe de fonctionnement d'un algorithme génétique simple [Salman, 2019]

Ces étapes sont répétées en boucle jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Les avantages des algorithmes génétiques sont leur efficacité à traiter des problèmes très complexes. Ils sont particulièrement utiles lorsque :

- L'espace de recherche est important et complexe
- Il existe peu de connaissances sur le sujet de recherches ou qu'elles sont incomplètes
- Il est compliqué de retranscrire et analyser mathématiquement le problème
- Les méthodes usuelles d'étude ne sont pas concluantes

De plus, ces algorithmes sont beaucoup plus accessibles puisqu'ils nécessitent beaucoup moins de connaissances en programmation de l'utilisateur.

Les algorithmes génétiques ont ainsi été utilisés dans de nombreux domaines :

- Optimisation : pour faire de l'optimisation combinatoire telle que résoudre le Traveling Salesman Problem [Hamilton, 19^e siècle]
- Programmation automatique : pour améliorer des programmes informatiques à partir de programmes existants pour répondre à de nouveaux objectifs
- Machine learning et robot learning : pour créer des applications d'apprentissage notamment de classification et de prédiction
- Economie : pour notamment modéliser l'évolution de marchés économiques
- Biologie : pour modéliser le système immunitaire et les mutations somatiques au cours de la vie d'individus et pour étudier l'évolution de la génétique de différentes populations
- Ecologie : pour modéliser les flux de ressources dans les écosystèmes
- Sociologie : pour étudier l'évolution des systèmes sociaux

2.5. OUTILS

On distingue ici trois types d'outil de conception assistée par ordinateur :

- les environnements de modélisation paramétrique et visuelle
- les bibliothèques de simulation environnementale
- les solveurs d'optimisation

RHINOCEROS / GRASSHOPPER :

Rhino 3D est un logiciel de modélisation de type NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), c'est-à-dire pouvant modéliser des formes complexes de façon très précise. Il est très utilisé en architecture pour la liberté formelle qu'il permet.

Grasshopper, composant de Rhino 3D, ajoute la possibilité de faire de la programmation visuelle. Il aide à l'automatisation d'opérations géométriques (Figure 16). En effet, il est spécialisé dans la génération et la manipulation de géométries paramétriques.

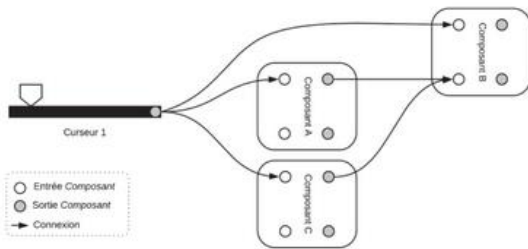


Figure-16 : Principe Fonctionnement Grasshopper [Tait, 2023]

En s'appuyant sur des éléments géométriques simples (points, surfaces, volumes,...), il est possible d'effectuer des opérations géométriques (création de formes) et mathématiques (extraction de données).

De plus, toute modification d'un paramètre entraîne la modification de tous les éléments auxquels il est rattaché. Cela favorise une logique d'exploration formelle et

d'évaluation de performance grâce aux données numériques extraites.

Il favorise donc une exploration de design plus rapide, notamment lors de recherches de typologies [Martín-Mariscal, 2025].

L'interface commune permet d'avoir accès à la représentation explicite et à la représentation symbolique en parallèle (Figure 17).

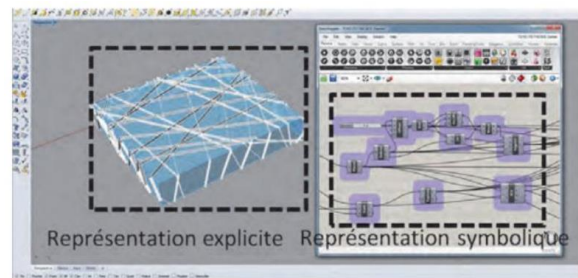


Figure-17 : Interface Rhino / Grasshopper [Tait, 2023]

LADYBUG :

Les Ladybug Tools fournissent des informations environnementales au design et en permettent une analyse plus large. En effet, ils définissent une localisation au projet, ce qui permet ensuite d'estimer par exemple l'ensoleillement, l'éclairage ou d'autres indicateurs thermiques. Ils sont par ailleurs d'une très grande précision, s'adaptant à la fois à des études à l'échelle urbaine qu'à l'échelle d'un édifice.

Ils s'appuient sur le modèle dessiné dans Grasshopper pour produire les simulations.

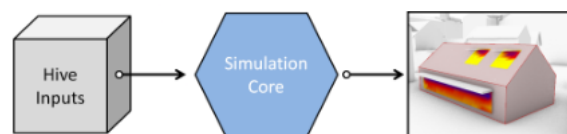


Figure-18 : Processus de Fonctionnement des simulations produites par Ladybug et Honeybee [Tait, 2023]

GALAPAGOS :

Galapagos est un composant d'optimisation intégré à Grasshopper. Il permet de trouver des solutions selon un objectif unique : la maximisation ou la minimisation d'un paramètre.

Il s'appuie à la fois sur la valeur du paramètre dont il doit trouver l'optimum et sur les variables de décision, c'est-à-dire les éléments dont il peut modifier les valeurs pour arriver à son but.

Galapagos utilise des algorithmes génétiques pour arriver à ses fins. Leur fonctionnement est décrit ci-dessous (*Figure 18*).

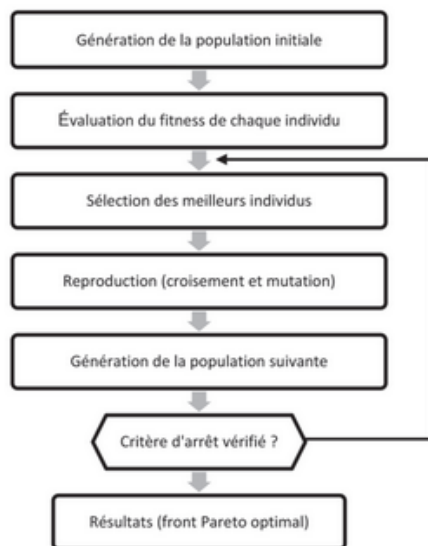


Figure-18 : Processus de Fonctionnement d'un algorithme génétique [Belaidi, 2006]

Son avantage principal est sa simplicité d'utilisation. En effet, il s'intègre à un programme Grasshopper tel n'importe quel autre module. Il constitue donc un outil pertinent pour l'exploration rapide en début de phase de conception.

2.6. APPLICATION A L'ECHELLE URBAINE

L'optimisation morphologique a été de nombreuses fois utilisée à l'échelle d'un édifice. Elle a notamment servi à l'étude de la performance thermique de bâtiments en fonction de leur forme et de leur compacité [Nguyen & Reiter, 2015].

Des chercheurs l'ont aussi utilisée pour optimiser la performance énergétique à l'échelle d'un îlot et maximiser l'apport en lumière naturelle des espaces publics environnants [Dogan & Reinhart, 2017].

Toutefois, elle semble être beaucoup moins utilisée à l'échelle urbaine.

En effet, l'optimisation à l'échelle urbaine est plus complexe car il y a plus d'interactions entre les éléments et sur des sujets plus larges.

Parmi les enjeux de l'optimisation à l'échelle urbaine, nous pouvons citer les enjeux environnementaux. En effet, à l'échelle urbaine, nous pouvons déceler les conséquences des éléments bâtis sur le quartier. La morphologie globale du quartier conditionne fortement l'ensoleillement reçu, la ventilation naturelle, les phénomènes d'îlots de chaleur urbains, la pollution atmosphérique,... [Perini, 2014]

Nous pouvons aussi citer les enjeux sociaux et économiques, plus difficilement « optimisables ». En effet, la conception à l'échelle urbaine inclut des sujets de mixité fonctionnelle, d'accessibilité aux services, de gestion des flux, de densité souhaitable, de valeur foncière,...

Il existe aussi des enjeux plus techniques. En effet, l'optimisation à l'échelle d'un quartier

demande des performances informatiques plus importantes de part l'augmentation du nombre de variables à traiter. Les algorithmes d'optimisation peuvent être moins concluants ou demander un coût computationnel tel que le travail n'est pas entrepris.

Enfin, nous pouvons mentionner des enjeux règlementaires. En effet, à l'échelle d'un bâtiment seul, les contraintes sont relativement simples. A l'échelle d'un quartier, elles sont plus hétérogènes et complexes. Le cadre règlementaire de Tokyo en est un très bon exemple puisque des typologies réglementaires très différentes se côtoient, même à l'échelle de quelques rues.

Des travaux récents montrent la pertinence de l'optimisation morphologique [Wang et al., 2024]. Elle a été appliquée à l'échelle urbaine pour étudier la performance thermique en fonction de la performance de l'éclairage naturel. La morphologie des bâtiments a ainsi pu être évaluée en fonction de leur forme, leur orientation, leur densité et l'espacement des volumes bâtis.

Cette approche, bien que très lourde, confirme que l'optimisation morphologique à l'échelle urbaine constitue un outil pertinent pour la conception de quartiers denses.

2.7. SITUATION SOLAIRE A TOKYO

L'ensoleillement est un élément symbolique très important dans la culture japonaise. En effet, le nom même du pays « Nihon » (日本) signifie « origine du soleil ». Ce nom remonte au 7^e siècle et fait référence à la situation géographique du pays. Il s'agit donc d'un élément central dans l'identité nationale.

Tokyo est située à 35,4 degrés de latitude nord. La ville est donc éclairée tout au long de l'année depuis le sud, à 31 degrés au solstice d'hiver (21 décembre) et à 78 degrés au solstice d'été (21 juin) (Figure 19).

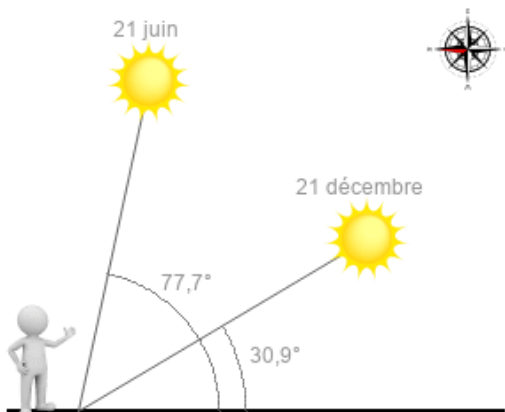


Figure-19 : Hauteur du soleil à Tokyo [Eglitis, 2021]

A titre de comparaison, pour une latitude similaire, nous pouvons observer des rayons d'incidence du soleil minimal et maximal très proches. C'est le cas pour Nicosie, la capitale de Chypre (Figure 20).

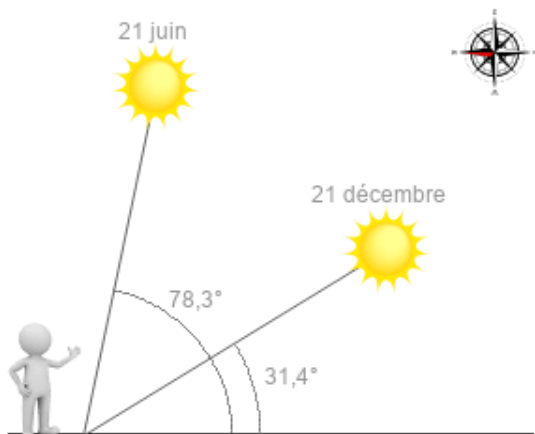


Figure-20 : Hauteur du soleil à Nicosie [Eglitis, 2021]

Toutefois, les heures d'ensoleillement réelles peuvent être très différentes selon les régions.

En effet, la ville de Tokyo a l'avantage d'avoir un ensoleillement moyen mais plutôt constant tout au long de l'année (Figure 21).

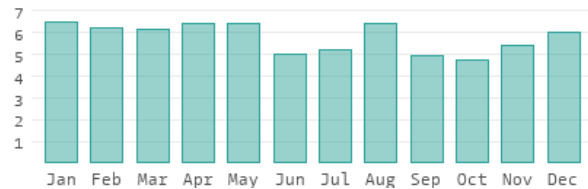


Figure-21 : Heures d'ensoleillement réelles à Tokyo [Eglitis, 2021]

Au contraire, pour la même latitude, l'île de Chypre a un ensoleillement plus différencié selon les saisons et un maximum deux fois plus élevé que Tokyo pour un minimum similaire (Figure 22).

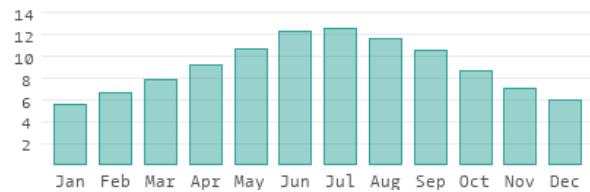


Figure-22 : Heures d'ensoleillement réelles à Nicosie [Eglitis, 2021]

Cela illustre le besoin de préserver au maximum l'entrée de la lumière naturelle dans les bâtiments, car, l'ensoleillement est un élément précieux, qui contribue grandement au confort intérieur des édifices et à la qualité de la vie des habitants.

Ainsi, dans un contexte urbain très dense, l'orientation et la taille des bâtiments doivent être pensées de manière stratégique pour maximiser l'arrivée de la lumière tout au long de l'année.

2.8. CONTEXTE DES REGLES D'OMBRE

La ville de Tokyo est un cas d'étude particulier. Il s'agit de l'une des métropoles la plus peuplée au monde, avec plus de 14 millions d'habitants et une superficie de plus de 2 000 kilomètres carrés. L'agglomération de Tokyo accueille, elle, plus d'un quart de la population du pays et s'étend sur plus de 4 000 kilomètres carrés. Elle est composée d'une grande richesse urbaine : au centre, des quartiers très denses composés essentiellement de gratte-ciels et en périphérie, des quartiers résidentiels pavillonnaires très étendus.

Il s'agit d'un territoire qui a été soumis à de nombreuses catastrophes rasantes, à plusieurs reprises, presque l'entièreté de la ville. Parmi eux le grand tremblement de terre de 1923 (*Figure 23*) et les Bombardements de Tokyo en 1945 (*Figure 24*) de la Seconde Guerre mondiale. La ville a ainsi été, plusieurs fois, presque entièrement renouvelée.



Figure-23 : Tokyo après le tremblement de terre de 1923 [Yokohama Central Library]



Figure-24 : Tokyo après les bombardements de 1945 [Chuo City Peaceful Prayer Virtual Museum]

Les règlements d'urbanisme tokyoïtes ont été introduits en réponse à la reconstruction rapide de la ville au milieu du 20ème siècle. La volonté de reloger la population rapidement puis la croissance économique du pays ont mené à une forte densification des quartiers centraux de la capitale.

Des réglementations ont donc été mises en place, notamment sur la hauteur des bâtiments et l'ombre projetée sur la rue et les constructions voisines. Le but était ainsi de garantir des bonnes conditions de vie à la fois dans la rue et à l'intérieur des constructions.

La notion de droit à la lumière est introduite dans le domaine juridique japonais en 1972. En effet, la Cour Suprême déclare que la lumière naturelle et la ventilation naturelle sont sujettes à protection légale. Cette annonce est faite en réponse à de nombreuses actions en justice visant à obtenir des dommages-intérêts pour cause de réduction de lumière naturelle perçue [Hirota Yoshiaki, 1976]. Ces grands procès ont marqué les années 1970 et l'association de défense des résidents mécontents du manque de réglementations, Le « Citizens' Alliance Against Building Nuisances », comptait alors au moins 164 000 membres (*Figure 25*).



Figure-25 : Habitants de Tokyo qui signent une pétition pour l'inscription du droit à la lumière et à la ventilation naturelle dans la loi, 1972

La première réglementation officielle sur les ombres projetées à Tokyo date de 1976. Le but était de contrôler le temps pendant lequel un bâtiment peut faire de l'ombre sur ses espaces environnants. Elle a été appliquée à

partir de 1977. De nouvelles dispositions pour les grattes ciels ont été ajoutées en 1997. Enfin, les règles d'ombres ont été révisées en 2002.

2.9. APPLICATIONS USUELLES

Les restrictions sur l'ombre projetée des bâtiments sont calculées selon deux zones autour de l'édifice : la zone entre 5 mètres de la limite parcellaire et la zone à 10 mètres de la limite parcellaire (Figure 26).

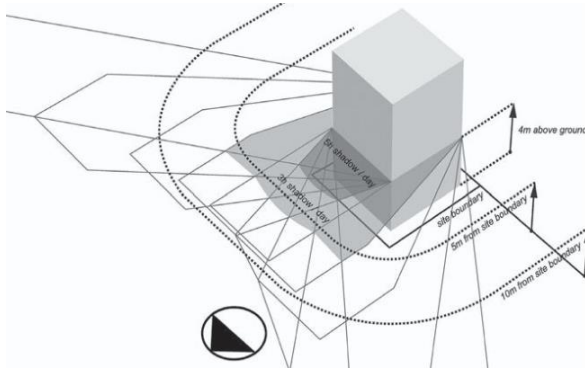


Figure-26 : Limites de distribution de l'ombre selon la réglementation nichiei-kisei [Tom Daniell]

A chacune de ces zones est associée une limite de temps maximale (en heure) pendant laquelle cette zone peut être privée de lumière naturelle.

Ces limites de temps sont définies en fonction du type de zone urbaine où se situe le bâtiment. En effet, les restrictions ne sont pas les mêmes pour les zones résidentielles, les zones industrielles et les zones commerciales. De plus, ces restrictions ne s'appliquent que si le bâtiment dépasse une certaine hauteur, elle aussi définie en fonction de la zone urbaine d'appartenance de la construction.

Dans les cas les plus simples, morphologiquement parlant, cela se traduit par des pentes à partir d'une certaine hauteur (Figure 27). Nous pouvons donc observer de nombreux bâtiments avec des étages supérieurs inclinés. Nous pouvons aussi citer des cas extrêmes comme le Temple Shakaden Reiyukai dont la réglementation a obligé la création de sa toiture singulière (Figure 28 et Figure 29).

Il est intéressant de noter que l'ombre portée est calculée à la « hauteur moyenne du niveau du sol ». C'est-à-dire que si le terrain est en

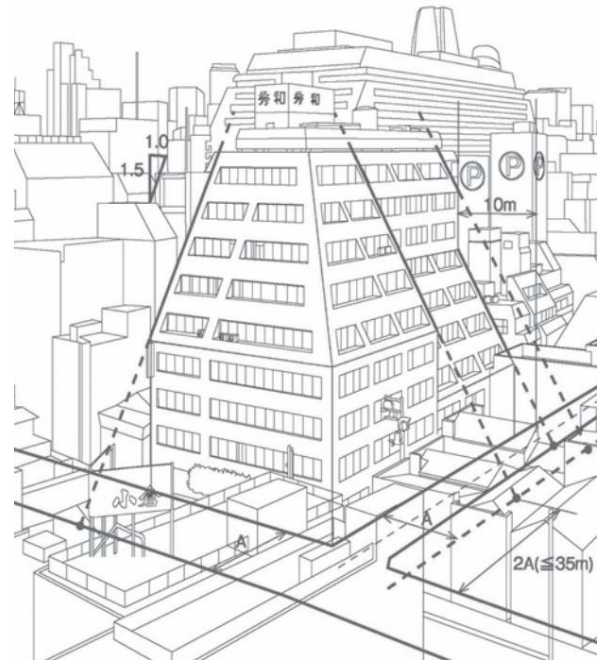


Figure-27 : Décodage des effets des réglementations shasen [Yasutaka Yoshimura]

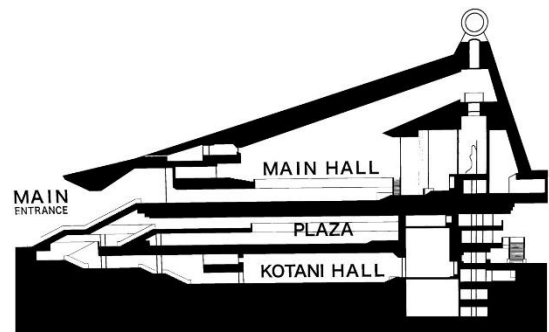


Figure-28 : Coupe du Temple Shakaden Reiyukai [Takenaka Corporation, 1975]



Figure-29 : Photo aérienne du Temple Shakaden Reiyukai, [Takenaka Corporation, 2006]

penne, tout est calculé selon cette ligne fictive afin de simplifier le calcul. Il arrive donc que certains bâtiments soient construits sur des sortes de piédestal pour augmenter le niveau moyen du sol et donc réduire la zone d'ombre créée par l'édifice.

Dans certains cas plus complexes, la régulation d'ombre peut créer des typologies très exiguës (Figure 30 et Figure 31).

Ces réglementations créent un sentiment général d'hétérogénéité dans la ville de Tokyo. En effet, elles ont tendance à contraindre la morphologie d'un bâtiment, parfois fortement. En revanche, dans d'autres domaines, comme le domaine esthétique, il n'y a que très peu de restrictions.

« Aucune autre ville ne présente une telle diversité de bâtiments dans ses rues, ni un tel désordre de couleurs et de formes décoratives sur leurs façades. Le chaos est le seul mot approprié pour la décrire. Mais je ne rejette pas inconditionnellement cette image de chaos. En substance, le chaos contient un présage de ruine. Pourtant, dans tant d'endroits de cette ville qui ressemble à un « vaste village » devant nous, les rues sont pleines de « vitalité ». Tokyo est aujourd'hui l'une des villes les plus passionnantes au monde... Dans la conception d'un seul bâtiment, la méthode d'expression de l'anarchie comme thème peut être établie comme une logique architecturale » [Shinohara, 1981].

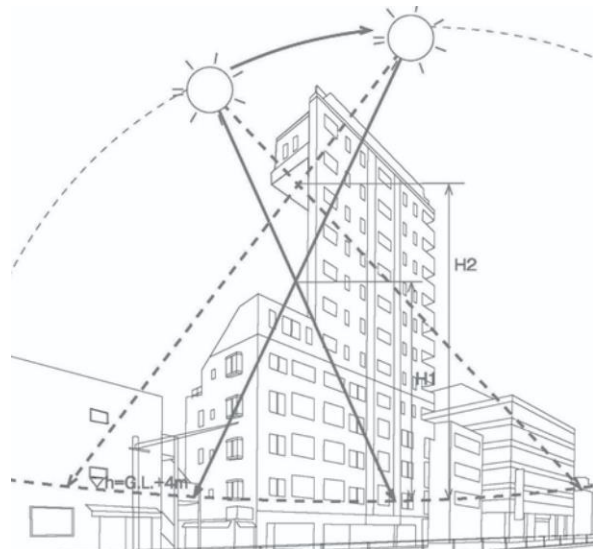


Figure-30 : Décodage des effets des réglementations shasen [Yasutaka Yoshimura]

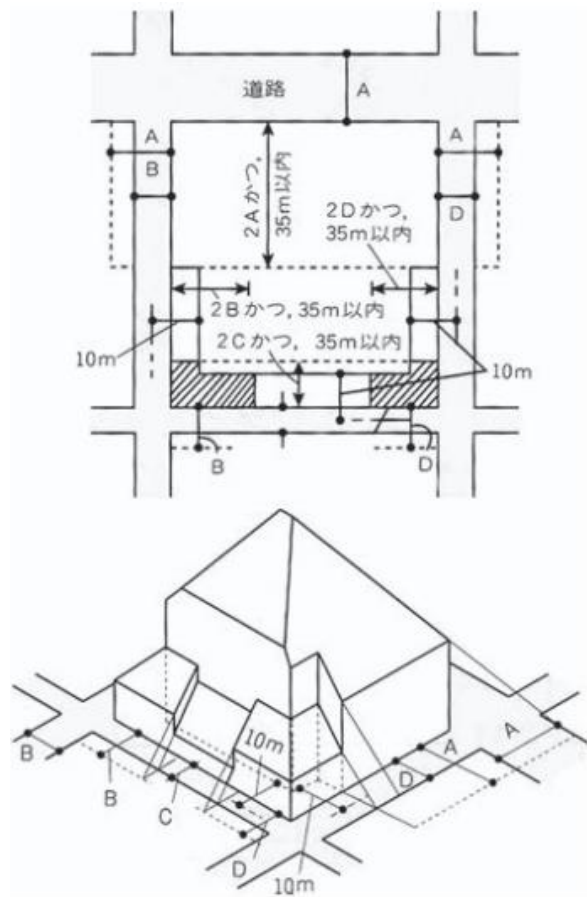


Figure-31 : Exemple de modélisation volumétrique requise par les réglementations shasen [Building Standards Law Guidebook]

2.10. DISCUSSIONS

Ces règles sont donc assez peu flexibles et ne prennent en compte que peu de paramètres pour en déduire les contraintes solaires :

- le zoning de la parcelle,
- les contours de la parcelle
- le niveau de sol moyen de la parcelle

Cette situation reflète les capacités informatiques des architectes à l'époque. En effet, dans les années 1970, le CAD n'est pas encore largement utilisé dans les agences d'architecture. Les calculs se faisaient donc à la main.

Au vu des outils dont nous disposons aujourd'hui, nous pouvons imaginer des règles plus complexes. En effet, les programmes informatiques pourraient dessiner le gabarit constructible en quelques secondes. Cela pourrait permettre de définir des règles plus sensibles à leur contexte et plus adaptées au besoin grandissant de mixité programmatique dans le milieu urbain.

De plus, ces règles semblent, théoriquement, très strictes.

Toutefois, il existe dans le droit japonais la notion de « limite de tolérance ». C'est à dire que certaines dérogations sont acceptées tant qu'elles ne sont pas excessives.

Par exemple, si un nouveau bâtiment construit dépasse les restrictions d'une heure par jour, une plainte ne sera probablement pas retenue par la justice japonaise.

Seuls les cas les plus extrêmes, un dépassement de plus de 5 heures par jour par exemple, pourraient être examinés par le système judiciaire local.

Ce fut le cas à Nagoya d'un édifice de 10 mètres de haut proposé dans un quartier de petites résidences individuelles où

l'ensoleillement était particulièrement favorable. Les juges ont examiné la durée de perte d'ensoleillement, le zonage du quartier, le respect ou non des règles de construction par le bâtiment et la durée pendant laquelle la zone bénéficiait auparavant de l'ensoleillement. La perte quotidienne de cinq heures d'ensoleillement a été jugée comme intolérable et le projet a été arrêté dans l'attente de modification des plans.

Cette règle est d'autant plus défendue par les résidents que la lumière naturelle est aujourd'hui une source d'énergie. Il y a ainsi eu des procès liés à des pertes de rendements de panneaux solaires photovoltaïques installés sur les toits des maisons individuelles. Cet accès à la lumière naturelle n'est donc plus seulement lié à des problématiques de santé publique mais aussi à la transition écologique.

Enfin la rigidité de ces règles est aussi remise en question par les exceptions qu'elle comporte. En effet, certains projets de grande ampleur ou de réaménagement urbain peuvent profiter d'un statut pour lequel le règlement est moins strict ou même ne s'applique pas.

3-METHODOLOGIE DETAILLÉE

3.1. INTRODUCTION GENERALE

La méthodologie employée dans ce mémoire repose sur de la modélisation paramétrique, de la simulation environnementale et de l'optimisation algorithmique.

L'objectif est d'évaluer les conséquences morphologiques, fonctionnelles et environnementales de différents scénarii de régulation d'ombre et d'identifier les règles qui favorisent le développement de quartiers urbains mixtes.

Il ne s'agit pas seulement d'appliquer un algorithme mais plutôt de traduire une logique règlementaire en objectifs quantifiables par les outils numériques.

Les textes de lois deviennent ainsi des paramètres et la ville est un système dynamique global [Wu et al., 2024].

Ce travail de recherche s'appuie sur les travaux de Yubo Wang [Wang et al., 2024] portant sur l'utilisation de l'optimisation architecturale à l'échelle urbaine lors de la planification et de la conception. (Figure 32)

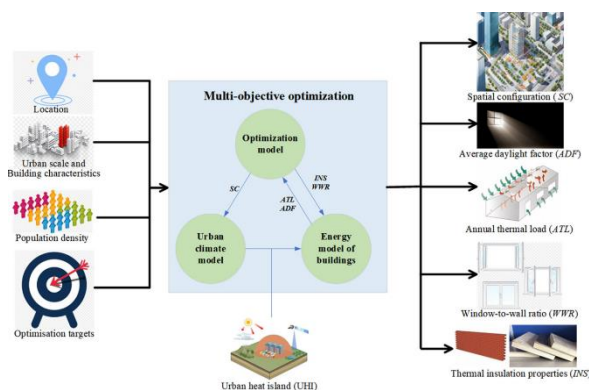


Figure-32 : Objectifs de l'utilisation de l'optimisation architecturale à l'échelle urbaine, [Wang et al., 2024]

L'auteur déplore ainsi un manque d'outils d'optimisation pour les premières étapes de la conception qui répondent aux différents enjeux du projet à cette phase.

C'est aussi à cette étape de conception sommaire que se place mon travail de recherches. En effet, la morphologie, imposée par des règles urbaines, conditionne la forme générale du bâtiment, dès la conception sommaire.

C'est en agissant sur les étapes les plus en amont d'un projet que nous pouvons avoir le plus de répercussions sur le projet résultant.

En effet, c'est ce qu'a démontré Patrick MacLeamy par une série de graphes : plus un projet architectural est avancé, plus il est difficile de le modifier (Figure 33).

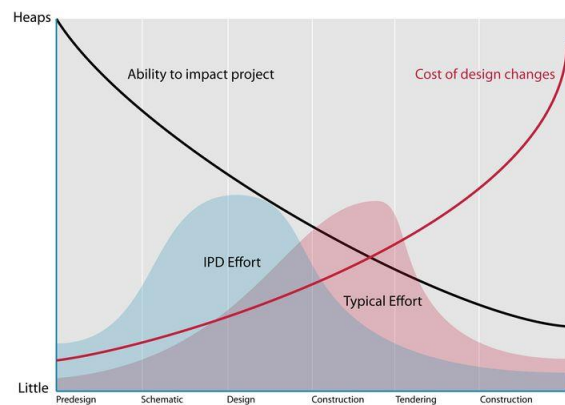


Figure-33 : MacLeamy curve [MacLeamy, 2004]

L'auteur préconise donc un meilleur approfondissement des sujets clés d'un projet lors des phases de conception, lorsque les conséquences sont encore gérables et peu coûteuses.

Daniel Davis ajoute que, à l'aide des outils de modélisation flexibles que nous avons aujourd'hui, les courbes sont légèrement modifiées. En effet, presque tout peut être modifié jusqu'au moment de la construction, avec des conséquences plus faibles sur l'avancée du projet (*Figure 34*).

Il s'agit toutefois d'une représentation idéalisée, car ces outils ne sont pas toujours utilisés au maximum de leurs capacités. De plus, certaines typologies architecturales ou certaines problématiques de conception particulières peuvent amplifier cette courbe.

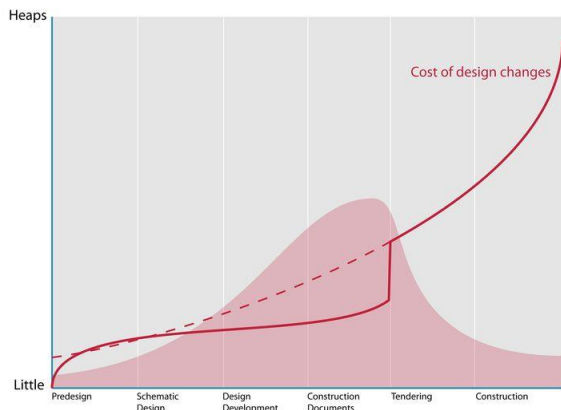


Figure-34 : Davis curve [Davis, 2011]

3.2. DÉFINITION DU SITE D'ETUDE

Le site d'étude choisi est à Harajuku. Il est localisé au nord de l'arrondissement de Shibuya et est connu pour ses magasins de mode de luxe et de culture populaire japonaise.

Il s'agit d'un espace très singulier, un terrain d'expérimentation architecturale pour de très grandes agences d'architecture japonaises et internationales.

Il constitue une bonne représentation de la ville de Tokyo de part son dialogue entre ses éléments de patrimoine protégés (temple de Meiji jingu) et la globalisation.

Détruit lors des bombardements de 1945, puis occupé par les troupes américaines, le quartier devient ensuite un symbole de modernité dans les années 1950 grâce à son foncier qui se libère peu à peu. Les installations olympiques de Kenzo Tange en 1964 illustrent parfaitement la liberté formelle qu'inspire ce quartier (Figure 35).

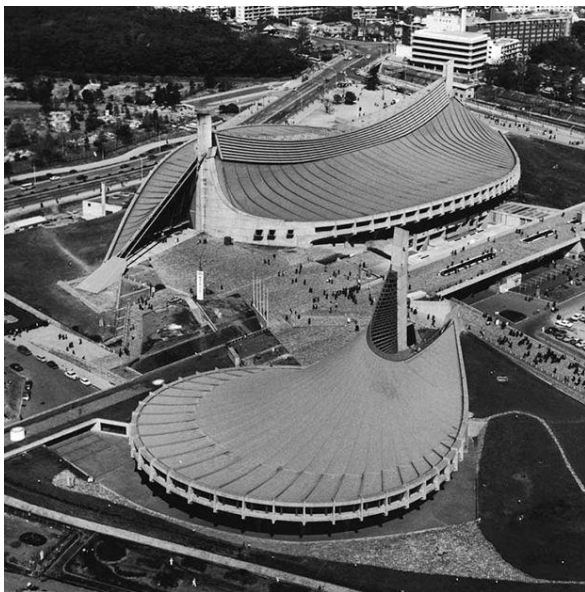


Figure-35: Yoyogi Stadium, Kenzo Tange, 1964

Aujourd'hui, les petites ruelles commerçantes continuent de coexister avec les projets monumentaux, créant un tissu urbain riche.

Le site choisi présente des caractéristiques intéressantes : il est à la limite de 3 zones de réglementation d'ombre différentes. Cela

permet de tester les règles mises en place sur 3 typologies urbaines différentes. La surface du site, d'environ 10 000 m², permet aussi de soumettre les règles à un grand nombre d'imbrications parcellaires et de morphologies de bâtiments (Figure 36).

Ici, la réglementation dispose donc que :

- Dans la zone 3-2 (zone résidentielle de moyenne et grande hauteur de type 1) : 3 heures d'ombre sont autorisées dans la zone à 5 mètres de la limite parcellaire et 2 heures dans la zone à 10 mètres de la limite parcellaire. On y trouve plutôt des petites maisons individuelles hautes de 2 étages en moyenne.

- Dans la zone 4-2,5 (quartier résidentiel de première classe) : 5 heures d'ombre sont autorisées dans la zone à 5 mètres de la limite parcellaire et 2,5 heures dans la zone à 10 mètres de la limite parcellaire. On y trouve des bâtiments légèrement plus hauts que dans la zone précédente, d'un étage de plus de moyenne.

- Dans la zone 5-3 (zone commerciale de proximité) : 5 heures d'ombre sont autorisées dans la zone à 5 mètres de la limite parcellaire et 3 heures dans la zone à 10 mètres de la limite parcellaire. Malgré des rues parfois plus étroites que dans les zones précédentes, la hauteur moyenne des bâtiments est presque doublée.

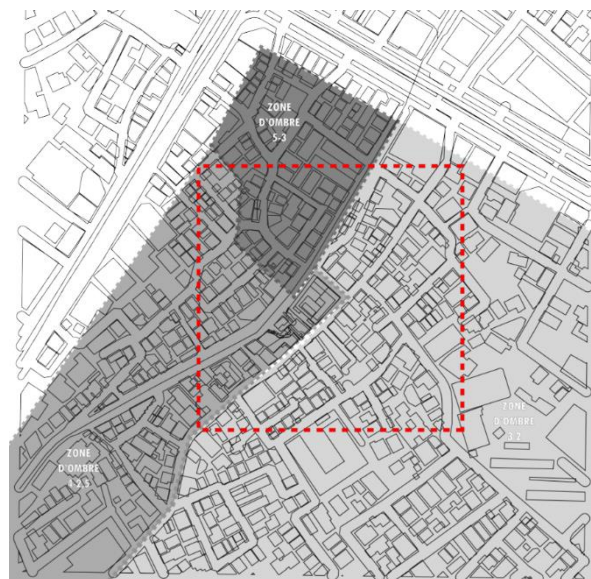


Figure-36: Carte zonage site d'étude

3.3. ENCODAGE DES REGLES D'OMBRE

L'encodage des règles d'ombre est une étape clé du processus de recherche. En effet, il s'agit de transcrire un ensemble de règles en un ensemble de contraintes mathématiques.

Dans le cas du site choisi, l'opération est d'autant plus délicate que le site se trouve au croisement de trois zones différentes. De plus, les règlementations tokyoïtes sont formalisées sous formes de diagrammes (Figure 37) et de tableaux (Figure 38).

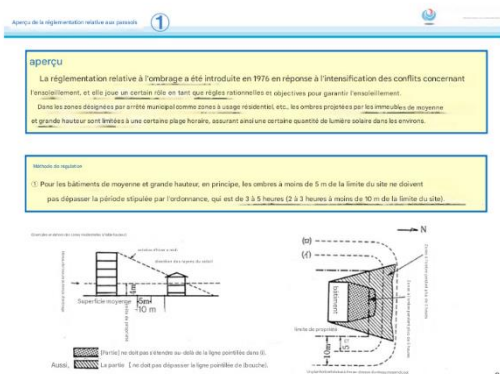


Figure-37: Extrait du Outline of City Planning de Tokyo, Traduction par Google Traduction

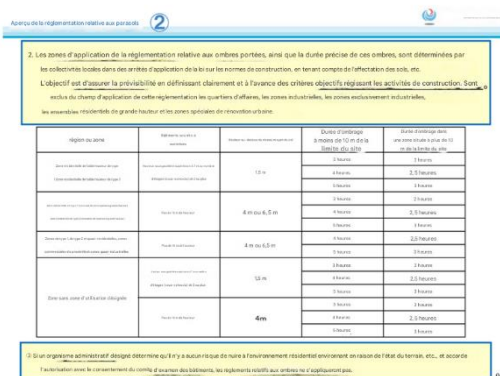


Figure-38: Extrait du Outline of City Planning de Tokyo, Traduction par Google Traduction

Une étape de reformulation est donc nécessaire pour transformer ces diagrammes en conditions algorithmiques.

La première étape consiste à déterminer les paramètres fixes, c'est-à-dire ceux qui ne

seront pas modifiés au cours du processus d'optimisation. Le premier est la limite de la parcelle. Elle représente l'aire constructible maximale, c'est-à-dire la surface limite de toute manipulation géométrique. Le second paramètre est l'orientation solaire du site. En effet, les trajectoires solaires sont fixées par la localisation du site qui restera inchangée tout au long des expériences. Ces trajectoires quotidiennes et saisonnières prédéterminées serviront de base au calcul des ombres portées. Elles seront apportées dans la modélisation à l'aide du fichier EPW (EnergyPlus Weather File) de la ville de Tokyo, qui contient les données météorologiques de l'emplacement, notamment la température, l'humidité, le rayonnement solaire, la vitesse du vent et les précipitations.

Il est ensuite possible de déterminer les paramètres variables. Le premier concerne la géométrie globale du bâtiment. Elle est variable dans les trois directions de l'espace : sa longueur, sa largeur et sa hauteur. Ces valeurs seront illustrées par des sliders Grasshopper afin de permettre une libre exploration des différentes solutions possibles.

Le second paramètre variable est la règle d'ombre appliquée à la parcelle. Dans le cas actuel, elle dépend du zonage tokyoïte. En effet, certaines zones commerciales du quartier bénéficient de règles plus assouplies pour privilégier le développement commercial des environs. Dans les cas testés, elle dépendra de l'usage de l'édifice.

Elles seront paramétrées sous la forme de conditions. C'est-à-dire que les ombres portées générées par la géométrie de l'édifice seront évaluées par rapport à une valeur seuil définie par la règle d'ombre applicable sur la parcelle.

3.4. DEVELOPPEMENT DU MODELE PARAMETRIQUE

La modélisation du site est réalisée grâce à des données ouvertes de cartographie et de modélisation 3D tel qu'OpenStreetMap. Les bâtiments et leur positionnement dans leur parcelle sont donc modélisés avec précision.

Pour coder les réglementations d'ombre dans le logiciel Rhinoceros et Grasshopper, il a fallu transformer des règles exprimées graphiquement en contraintes mathématiques.

Le modèle paramétrique est ainsi structuré de la manière suivante :

- Géométrie de base (parcelle)
- Forme possible dans la limite de la parcelle (sliders pour x, y et z) et calcul de la surface utile brute
- Usage (résidentiel, commercial, équipement,..) avec un pourcentage associé pour chacun

Un premier modèle simplifié a été créé afin de d'optimiser la morphologie d'un bâtiment selon les ombres portées qu'il génère sur son environnement tout en maximisant sa surface utile. Etant dans un contexte urbain assez dense, les propositions les plus « optimales » d'après Galapagos étaient un gratte-ciel. Les réglementations sont donc indispensables à ajouter pour ne pas créer des bâtiments déconnectés de leur contexte.

Ensuite, un modèle général a été créé à l'échelle du quartier entier. Chacune des parcelles a été modélisée et associée à sa contrainte d'ombre actuelle. Ce modèle permet de visualiser clairement les conséquences des régulations en vigueur. En effet, dans les rues où chaque côté a une règle différente, les formes urbaines sont assez différentes.

A partir de ce modèle général, deux autres règles ont été testés :

- Une règle agissant sur un usage programmatique.
- Une règle agissant sur la mixité programmatique globale.

3.5. SIMULATION HELIODONNALE

La simulation héliodonnale est une étape clé de cette modélisation. En effet, elle permet de qualifier et quantifier les conséquences des morphologies urbaines générées.

Elle repose sur les Ladybug Tools intégrés à Grasshopper. La qualité de ces outils est cruciale car la précision de la géométrie, de la résolution temporelle et de la validité des données climatiques sont gage d'une simulation urbaine réussie [Reinhart & Walkenhorst, 2001].

Ces outils sont utilisés dans le but d'une part, de mesurer et cartographier les ombres portées et d'autre part, de fournir ces données aux modules suivants d'optimisation.

Pour chaque édifice à optimiser, les éléments nécessaires sont donc l'étendue et la durée des ombres portées sur les surfaces alentours.

Les calculs sont effectués au moment où l'ensoleillement est minimal, c'est-à-dire le 21 décembre au solstice d'hiver.

Ladybug permet alors de produire des cartes de radiation des temps d'exposition et d'ombre portée sur les plans horizontaux et verticaux. (*Figure 39*)

La granularité du maillage et le pas temporel sera choisi afin de trouver un équilibre entre la précision des données voulues et le temps d'obtention de résultats par le software. Les résultats sont ainsi intégrés à Grasshopper sous forme de visualisation 3D afin de permettre une lecture plus intuitive des résultats en plus d'une lecture quantitative.

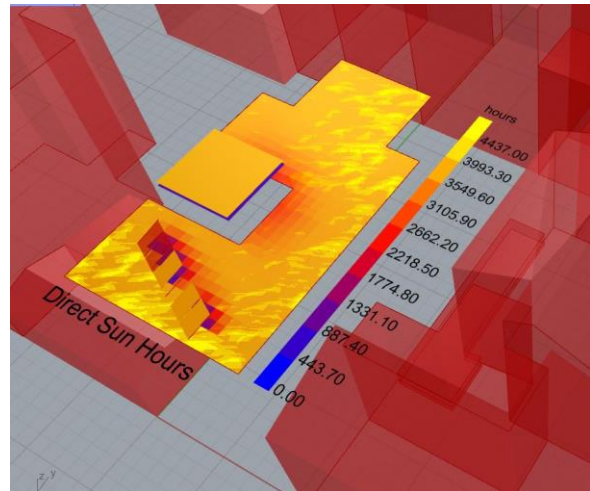


Figure-39: Exemple de carte de radiation

Ainsi, à l'aide Ladybug, il est possible de mesurer le temps d'exposition des seuils de moins de plus de 5m et de plus de 10m.

3.6. OPTIMISATION

Galapagos est ensuite utilisé pour faire une optimisation monocritère.

L'optimisation est l'étape la plus importante de cette modélisation. En effet, elle permet d'analyser et visualiser les conséquences spatiales des règles ombres actuelles et des scenarii testés. Il est important de rappeler que les résultats obtenus sont des configurations performantes et non des solutions absolues.

Les variables de décision que l'algorithme peut faire varier sont les suivantes :

- La hauteur du bâtiment
- Son emprise au sol (dans la limite de sa parcelle)
- La proportion de chacun des usages

Galapagos étant un outil d'optimisation monocritère, la fonction objective doit être définie par une seule valeur. Ici l'objectif fixé est la maximisation du volume bâti. En effet, les autres éléments tels que le respect des réglementations d'ombre seront intégrés au programme Grasshopper en amont de l'optimisation.

Les résultats de l'optimisation sont présentés sous forme de nuages de points (*Figure 40*).

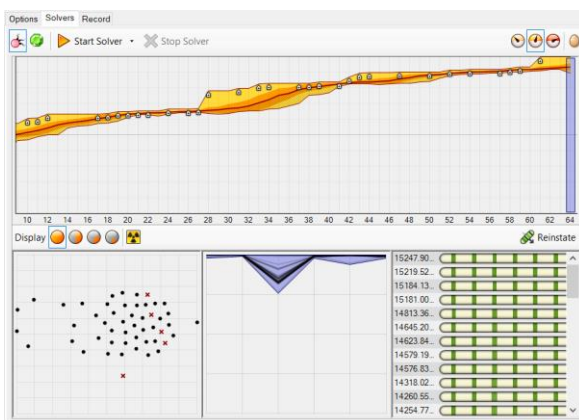


Figure-40: Exemple de présentation des résultats de Galapagos

Cette représentation visuelle permet d'identifier très facilement le scenario avec le volume bâti le plus important.

3.7. VALIDATION ET INTERPRETATION

La phase de validation vise à évaluer la pertinence des résultats obtenus suite à l'optimisation.

Les résultats des deux scenarii sont évalués selon deux critères. En premier lieu, leur volume bâti doit correspondre au volume bâti permis par les réglementations actuelles. En effet, l'objectif n'est pas de densifier le quartier ni de détériorer l'accès à la lumière naturelle de ses habitants.

En second lieu, la mixité programmatique induite par les scenarii doit être la plus élevée possible.

Par ailleurs, l'interprétation des résultats a pour but de mettre en avant les paramètres clés qui influent sur la morphologie urbaine et les types de règles les plus efficaces. En effet, l'objectif est aussi de comprendre quels mécanismes garantissent une règle pertinente à l'échelle urbaine.

Les premières versions de ce test ont montré l'importance de limiter l'emprise bâtie des bâtiments mobiles à leur parcelle. En effet, sinon, ils ont tendance à prendre des proportions bien trop importantes. (Figure 44).

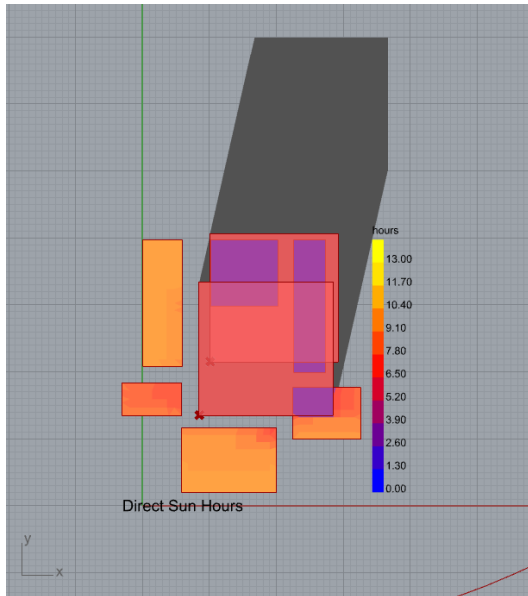


Figure-44 : Test simplifié, Resultat 1

De plus, les essais suivants (avec une surface au sol plus limitée pour les bâtiments mobiles) ont aussi montré la nécessité de définir une hauteur maximale réaliste.

En effet, passé une certaine hauteur, le rapport le plus « optimal » est celui où le volume total bâti est tellement important qu'il arrive à contrebalancer les impacts d'ombre sur les bâtiments environnants (Figure 45, 46 et 47).

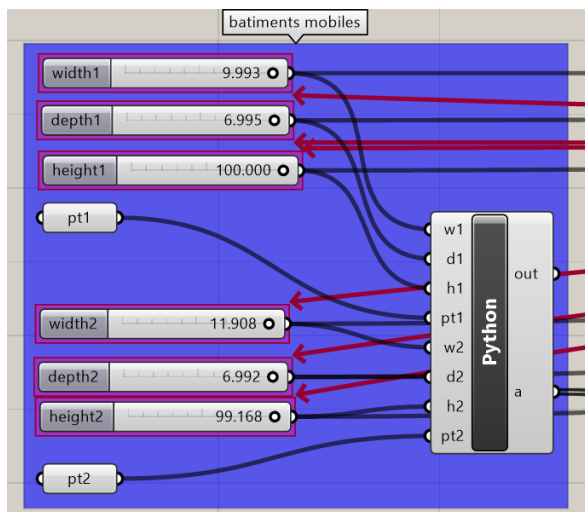


Figure-45 : Test simplifié, Resultat 2

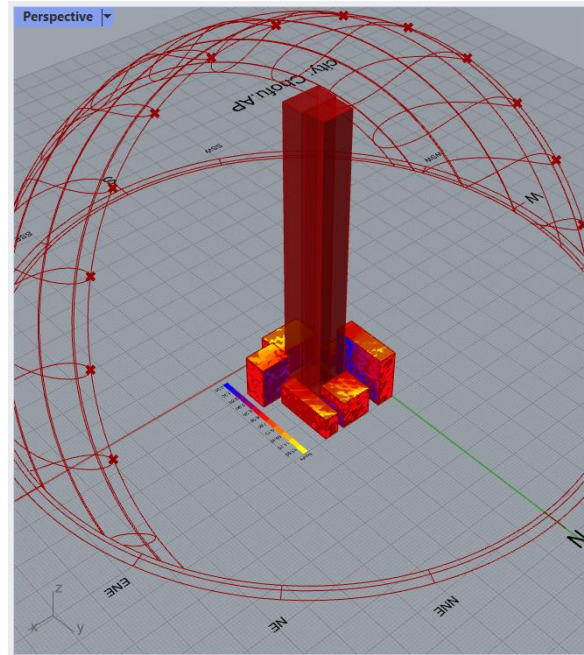


Figure-46 : Test simplifié, Resultat 2

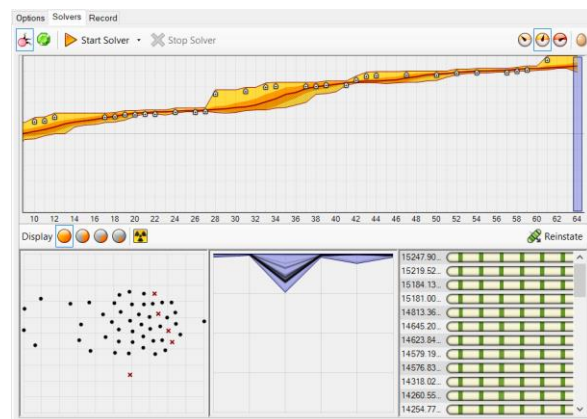


Figure-47 : Test simplifié, Resultat 2

4.2. SIMULATION DES REGLES ACTUELLES

4.2.1 MODELISATION DU SITE

La modélisation du site est une étape cruciale du processus de simulation car elle conditionne la qualité des résultats obtenus par la suite.

Cette étape consiste donc à récolter les données urbaines et les transformer en éléments exploitables. Pour garantir le bon déroulement de l'expérience, le périmètre général de 10 000 m² a été réduit et centré au niveau de l'intersection des trois zones (Figure 48).

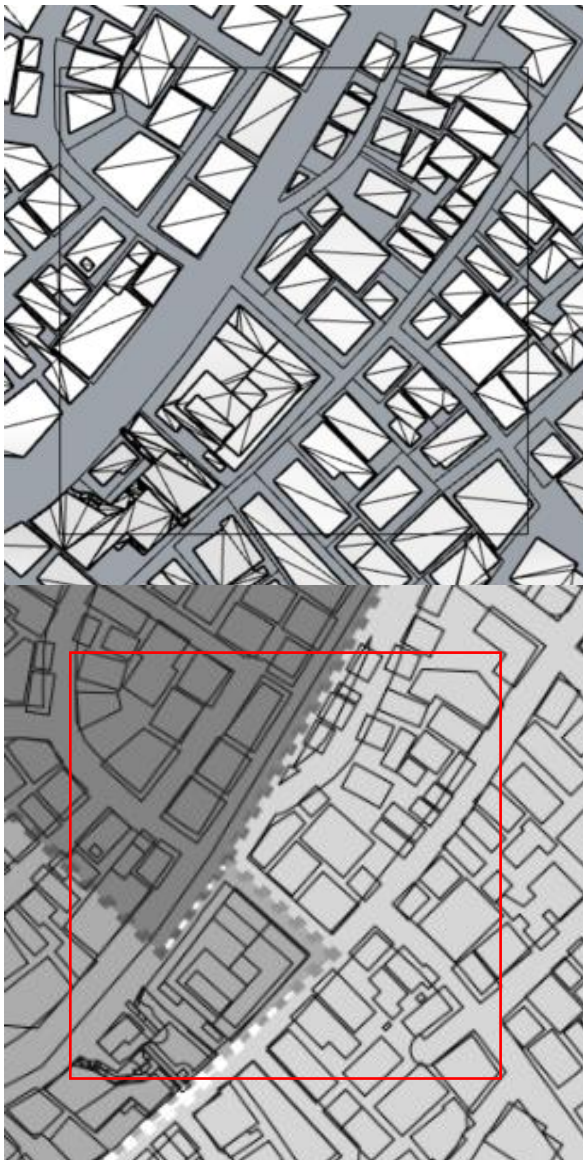


Figure-48 : Nouveau découpage du site : sur le fichier Rhino tel que récupéré (haut) et avec découpage zones (bas)

Les données cadastrales ont été récupérées d'une base de données ouverte : OpenStreetMap, et converties dans un format compatible avec Rhinocéros3D.

Toutefois, les données cadastrales obtenues n'étaient pas en parfait état. Il a donc fallu retracer à la main les parcelles avec pour référence les données incomplètes d'OpenStreetMap et les plans de zonage de l'arrondissement.

Le dessin épuré suivant a ainsi pu être obtenu (Figure 49). Nous pouvons toutefois noter que cette étape peut être une source de très légères erreurs du fait des incertitudes sur les données d'appui.

Ce nettoyage géométrique a néanmoins permis de minimiser les erreurs lors des étapes suivantes de l'expérience.

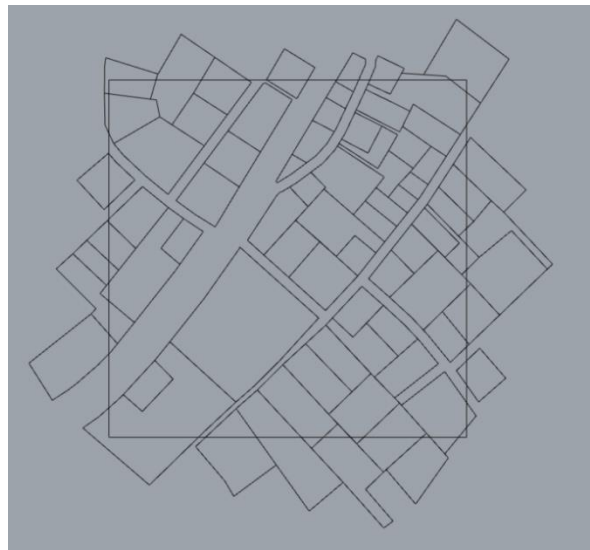


Figure-49 : Dessin Parcelaire du site étudié

4.2.2 MISE EN PLACE DES REGLES D'OMBRE

De la même façon, les bandes de 0 à 5 mètres de la parcelle et de 5 à 10 mètres de la parcelle sont paramétrées. Pour rappel, la réglementation d'ombre tokyoïte calcule l'influence de l'ombre d'un édifice en temps maximal (en heures) d'ombre dans chacune des bandes (Figure 52).

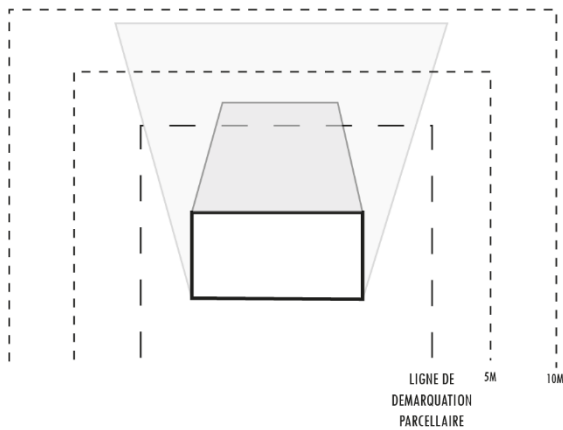


Figure-52: Règlement d'ombre tokyoïte plan [illustration propre]

Le même module « Offset » est donc utilisé pour créer les surfaces 5 mètres et 10 mètres autour de la parcelle. Les deux bandes de mesure de l'ombre sont ainsi définies par soustraction des surfaces (Figure 53).

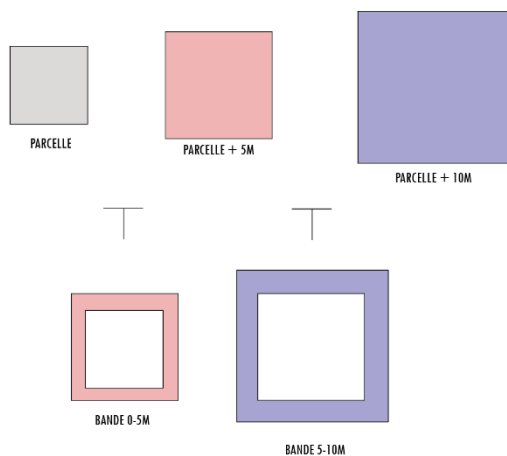


Figure-53: Processus création bandes ombre [illustration propre]

Cela est mis en place dans Grasshopper de la façon suivante (Figure 54):

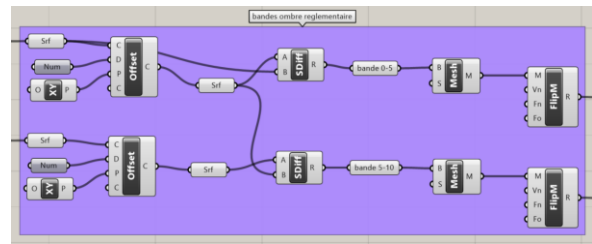


Figure-54: Processus création bandes ombre Grasshopper

Nous obtenons ainsi les données suivantes qui seront utiles pour le reste de l'expérience :

- Les surfaces sur lesquelles la durée d'ombre sera mesurée

Afin de calculer la durée d'ombre maximale sur chacune des bandes, nous faisons appel au plug-in Ladybug.

A l'aide du fichier EPW (EnergyPlus Weather) de Tokyo, il est possible de récupérer la position du soleil à chaque heure de chaque journée.

La période d'analyse est restreinte à une journée par la réglementation japonaise : le 21 décembre (le solstice d'hiver), car il s'agit de la journée où les ombres sont les plus contraignantes.

Il a ensuite été défini une fenêtre temporelle de calcul : de 9h à 15h afin que le soleil soit déjà assez haut dans le ciel pour que les ombres soient représentatives. Il s'agit de la période d'évaluation réglementaire d'après la loi japonaise.

De plus, le pas d'évaluation est d'une heure car le résultat voulu est en heure. Ainsi, à chaque heure de la période, il suffira de déterminer si le point mesuré reçoit de la lumière directe ou non et en faire la somme sur la période, ce qui simplifie le calcul.

Le plug-in Ladybug est ainsi capable de générer les vecteurs solaires pour la position et les heures données (Figure 55).

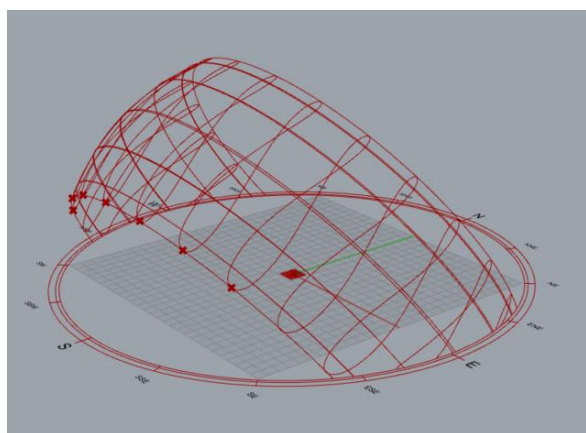


Figure-55: Vecteurs solaires générés par Ladybug

Cela est mis en place dans Grasshopper de la façon suivante (Figure 56):

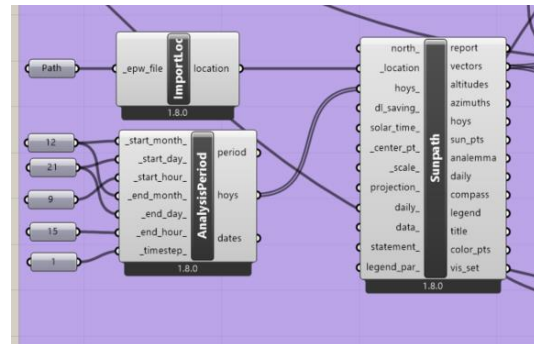


Figure-56: Processus évaluation temps ombre Grasshopper

Le calcul du temps d'ombre est réalisé par le composant DirectSunHours de Ladybug. Il divise chacune des bandes (0-5 mètres et 5-10 mètres) en un ensemble de points test. Il détermine ensuite pour chaque point le nombre d'heures pendant lesquelles le rayonnement solaire atteint ce point. Il calcule donc l'opposé de ce que nous voulons obtenir.

Afin d'obtenir, pour chacun de ces points, le temps où il est à l'ombre, nous appliquons à chacun des points la formule suivante :

$$\text{Nombre d'heure passées à l'ombre} = \text{Nombre d'heures totales (ici 7)} - \text{Nombre d'heures passées au soleil}$$

Cela est mis en place dans Grasshopper de la façon suivante (Figure 57):

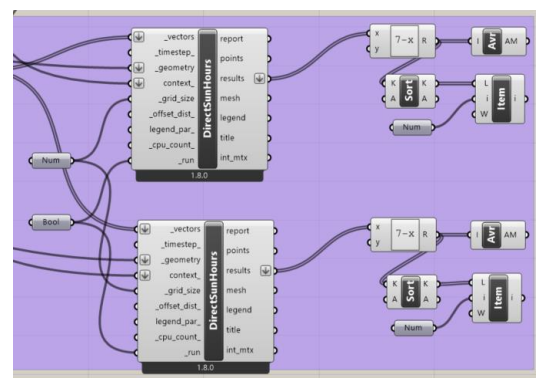


Figure-57: Processus évaluation temps ombre Grasshopper

A partir de la liste complète du nombre d'heures passées à l'ombre de chaque point, nous pouvons déterminer le maximum de temps d'ombre par bande et la moyenne de temps d'ombre par bande.

La réglementation s'appuie sur la valeur maximale d'ombre par bande réglementaire. Toutefois, la moyenne peut aussi être intéressante à prendre en compte car elle permet d'identifier des possibles « maximums isolés ». C'est-à-dire une valeur maximale à un endroit spécifique qui n'est pas représentative de la tendance générale sur la bande réglementaire.

Nous obtenons ainsi les données suivantes qui seront utiles pour le reste de l'expérience :

- La durée maximale (en heure) d'ombre par bande réglementaire
- La durée moyenne (en heure) d'ombre par bande réglementaire

Ensuite, un principe de pénalité est mise en place. Afin de forcer les bâtiments formés à respecter les seuils d'ombre fixés, leur volume n'est pris en compte que si cette condition est respectée dans chacune des bandes (*Figure 58*).

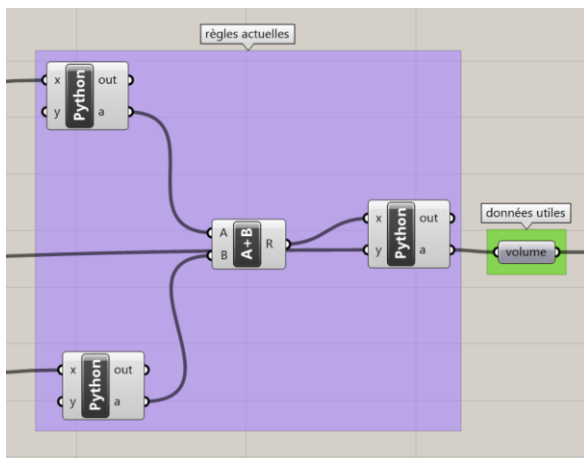


Figure-58: Processus respect réglementations ombre, règles actuelles, Grasshopper

4.2.3 INDICE DE SHANNON

Afin d'évaluer la pertinence des régulations en terme de mixité d'usage, il faut introduire deux paramètres supplémentaires dans le modèle paramétrique.

D'abord le pourcentage d'usage. C'est-à-dire que chaque édifice a, en plus de son volume total bâti, une répartition des usages dans celui-ci. Les trois usages possibles sont les suivants : résidentiel, commercial et équipement public. Ces pourcentages sont donc interdépendants puisque leur somme doit toujours être égale à 1.

$$p(\text{résidentiel}) + p(\text{commercial}) + p(\text{équipement}) = 1$$

$$p(i) \in [0; 1]$$

Cette démarche s'inscrit dans le but de favoriser ou défavoriser ensuite certains usages d'après les nouvelles règles définies.

Cela est mis en place dans Grasshopper de la façon suivante (Figure 59):

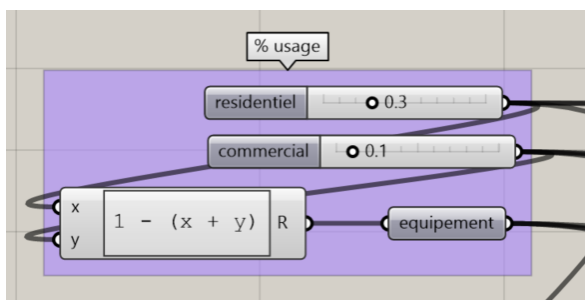


Figure-59: Usages des bâtiments Grasshopper

Ensuite, nous introduisons un indice de mixité, ici l'indice de Shannon [Shannon, 1948]. Il est très pertinent pour mesurer la diversité d'un système. Il permet ainsi de mesurer la richesse programmatique du site étudié.

L'indice de Shannon (H) est défini par les formules suivantes :

p : proportion d'usage

N : classes d'usage

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \ln(p_i)$$

$$H_{norm} = \frac{H}{\ln(N)} = - \frac{1}{\ln(N)} \sum_{i=1}^N p_i \ln(p_i)$$

ici $N = 3$

Cela est mis en place dans Grasshopper de la façon suivante (Figure 60):

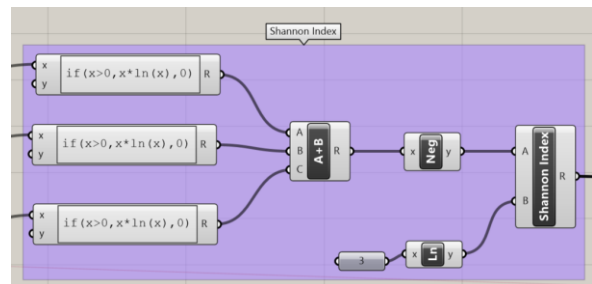


Figure-60: Indice de Shannon Grasshopper

Nous obtenons ainsi les données suivantes qui seront utiles pour le reste de l'expérience :

- Le score de l'indice de Shannon pour chaque répartition d'usages

L'indice de Shannon normalisé donne une valeur de mixité entre 0 et 1 (*Figure 61*).

Lorsque la valeur est comprise entre 0 et 0,15, cela traduit une situation de mono fonctionnalité totale. C'est-à-dire, un usage unique ou largement dominant qui constitue l'ensemble du volume bâti.

Lorsque la valeur se situe entre 0,15 et 0,30, la mixité d'usage est qualifiée de très faible. Un usage principal domine toujours, mais d'autres usages secondaires sont perceptibles.

Lorsque la valeur se situe entre 0,30 et 0,45, la mixité d'usage est entre faible et modérée. Il existe alors plusieurs usages bien identifiables mais leur répartition est très irrégulière.

Lorsque la valeur est comprise entre 0,45 et 0,60, la mixité d'usage est considérée comme bonne. La diversité est clairement remarquable et pérenne.

Lorsque la valeur est entre 0,60 et 0,75, la mixité fonctionnelle est forte et les usages sont repartis de manière relativement homogène.

Enfin, au-dessus de 0,75, la mixité d'usage est considérée comme très élevée voire idéale.

| Valeur Indice Shannon | Interprétation |
|------------------------------|-------------------------|
| 0 – 0,15 | mono fonctionnalité |
| 0,15 – 0,30 | mixité très faible |
| 0,30 – 0,45 | mixité faible à modérée |
| 0,45-0,60 | mixité modérée à bonne |
| 0,60 – 0,75 | forte mixité |
| > 0,75 | mixité très élevée |

Figure-61: Interprétation indice de Shannon normalisé

4.2.4 EVALUATION DES REGLES ACTUELLES:

Ces règles actuelles ont ensuite été évaluées grâce à une optimisation monocritère. L'objectif est de comprendre le volume total que ces réglementations autorisent et d'analyser les effets indirects sur la diversité fonctionnelle.

Les valeurs obtenues ici serviront donc de point de références pour les expérimentations suivantes.

La maximisation du volume total bâti selon les règles actuelles a donné la solution suivante (Figure 62). Il est important de rappeler que ce résultat est un optimum local calculé et non un maximum strict.

| volume | pres | pcom | pequip | Hnorm |
|----------------------|------|------|--------|-------|
| 12195 m ² | 0,31 | 0,69 | 0 | 0,56 |

Figure-62: Résultats réglementations actuelles

Ces données nous informent toutefois sur plusieurs points :

En premier lieu, le volume construit est assez élevé. De fait, malgré des règles assez sévères, il est possible de densifier assez fortement la ville. Néanmoins ces réglementations entraînent une uniformisation des morphologies constructibles. En effet, les parcelles les plus larges ont tendance à maximiser leur emprise au sol mais à avoir peu d'étages. Au contraire, les parcelles les plus minces réduisent leur emprise au sol au profit d'un nombre d'étages assez élevé. (Figure 63).

Ainsi les règles actuelles permettent une densité élevée mais orientent vers des configurations urbaines spécifiques qui peuvent avoir des conséquences d'un point de vue social.

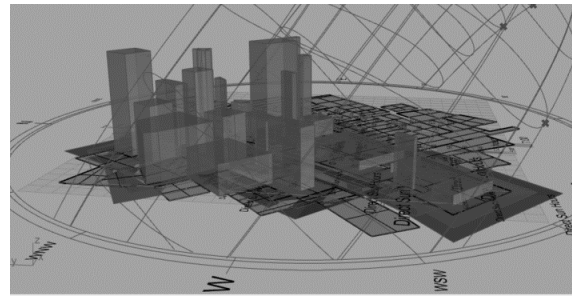


Figure-63: Résultats réglementations actuelle, visualisation

En second lieu, le zoning sur le site choisi amène à un déséquilibre flagrant des usages (Figure 54). En effet, le quartier reste en grande majorité commercial. Cela s'explique notamment par une réglementation plus souple pour ces bâtiments. Les usages résidentiels, plus contraints par les exigences de qualité d'ensoleillement et de confort, sont alors moindre dans la répartition globale des usages.

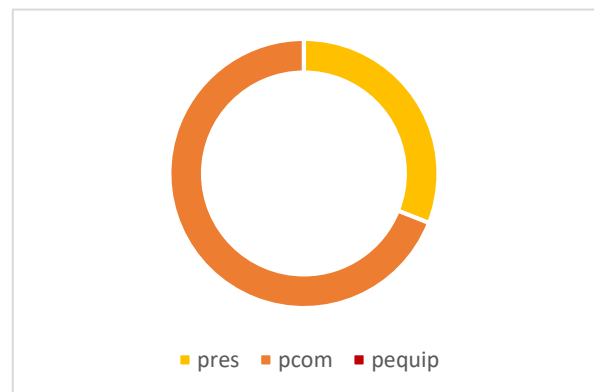


Figure-64: Répartition des usages, réglementations actuelles

L'indice de Shannon normalisé traduit donc un niveau de mixité modéré (Figure 65). C'est-à-dire une zone dominée par un usage principal.

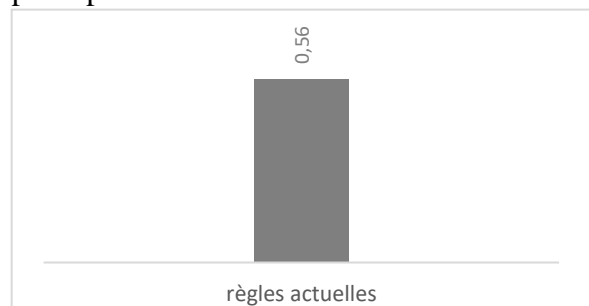


Figure-65: indice de Shannon, réglementations actuelles

4.3. TEST DE REGLES ALTERNATIVES

4.3.1 DEFINITION DES SCENARIIS

Nous avons défini deux scénarii à tester afin de déterminer si un assouplissement des règles d'ombre pourrait avoir une influence significative sur la mixité urbaine. Tout le site se placera ainsi dans un scénario de base de zone 4-2, c'est-à-dire la régulation moyenne sur le site.

A – Premier scénario :

Le premier scénario vise à prioriser un rapport équilibré entre les logements et les commerces. Pour cela, il agit sur la proportion d'usages résidentiels (avec un impact direct sur la proportion de commerces).

Nous obtenons donc le scénario suivant :

$$\text{si } 0.3 < p(\text{res}) < 0.6$$

alors,

$$\begin{aligned} \text{Seuil ombre arrangé} \\ = \text{Seuil ombre standard} * \end{aligned}$$

$$(1 + a)$$

$$\text{avec } a \in [0; 1]$$

L'objectif est de faire varier le paramètre a afin d'obtenir la règle donnant le meilleur rapport entre le volume total bâti et l'indice de Shannon.

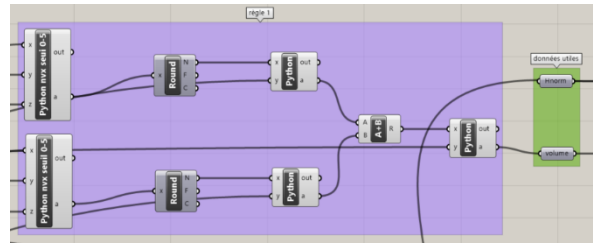


Figure-66: Processus respect réglementations ombre, règle 1, Grasshopper

Le même principe de « pénalité » que pour les règles actuelles est instauré ici. Toutefois, ici le nouveau seuil d'ombre est calculé en fonction de la proportion d'usage résidentiel, avant d'être comparé à l'ombre portée du bâtiment. De même, si l'ombre portée maximale par bande ne correspond pas à la réglementation instaurée, le volume bâti n'est pas comptabilisé (Figure 66).

Le paramètre a est ensuite modifié au cours des différentes expériences afin d'obtenir la règle avec le paramètre le plus satisfaisant selon les critères suivants :

- Volume bâti similaire à l'existant
- Mixité d'usage (indice de Shannon élevé)

B – Deuxième scénario :

Le deuxième scénario vise à favoriser la mixité urbaine plus largement. En effet, nous pouvons supposer qu'une action sur un seul usage peut avoir des résultats mitigés.

Ainsi, dans le scénario suivant, plus l'édifice a des usages équilibrés, plus les seuils d'ombre sont assouplis.

Nous obtenons donc le scénario ci-dessous :

$$\begin{aligned} \textit{Seuil ombre arrangé} \\ &= \textit{Seuil ombre standard} \\ &\quad * (1 + b * Hnorm) \\ \textit{avec } b &\in [0; 1] \end{aligned}$$

De même, l'objectif est de faire varier le paramètre b afin d'obtenir la règle donnant le meilleur rapport entre le volume total bâti et l'indice de Shannon.

Ainsi, dans ce scénario, le nouveau seuil d'ombre est calculé à partir de l'indice de Shannon pour chaque édifice. Ensuite, comme dans le scénario précédent, le volume de l'édifice est pris en compte dans le volume bâti total seulement si le nouveau seuil d'ombre est respecté (*Figure 67*).

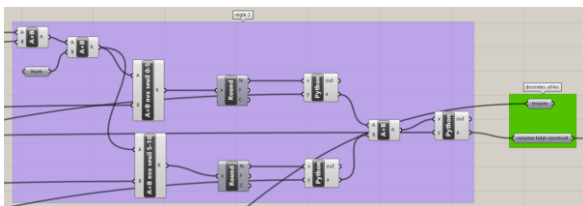


Figure-67: Processus respect réglementations ombre, règle 2, Grasshopper

4.3.2 EVALUATION DES SCENARIIS

A – Premier scenario :

Pour rappel, le premier scenario correspond à la règle suivante :

$$\text{si } 0.3 < p(\text{res}) < 0.6$$

alors,

Seuil ombre arrangé

$$= \text{Seuil ombre standard} * (1 + a)$$

$$(1 + a)$$

$$\text{avec } a \in [0; 1]$$

Le scénario a été testé pour différentes valeurs de a : 0,3 ; 0,5 ; et 0,7. Les résultats sont présentés ci-dessous (Figure 68) :

| a | volume | pres | pcom | pequip | Hnorm |
|-----|--------|------|------|--------|-------|
| 0,3 | 8547 | 0,25 | 0,3 | 0,45 | 0,97 |
| 0,5 | 12039 | 0,3 | 0,27 | 0,43 | 0,98 |
| 0,7 | 12845 | 0,26 | 0,25 | 0,49 | 0,95 |

Figure-68: Résultats scenario 1

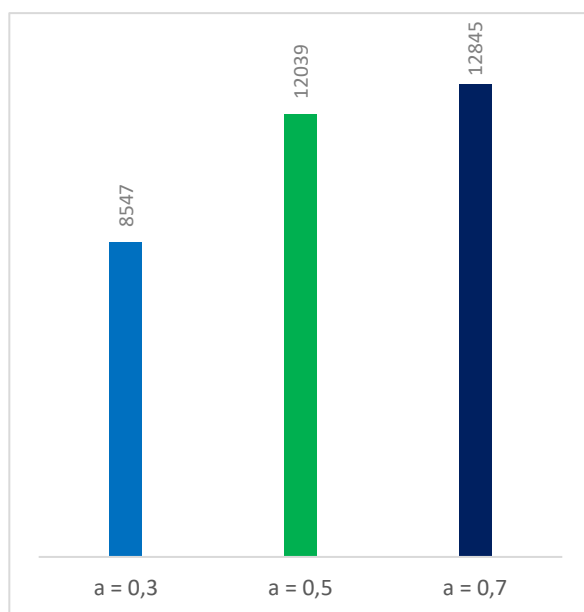


Figure-69: Volume bâti, scenario 1

Nous pouvons d'abord observer que le volume bâti avec cette règle est proche du volume bâti avec les règles actuelles. En particulier les règles ayant comme paramètre a = 0,5 et a = 0,7 ont respectivement environ 1% et 5% d'écart avec le volume bâti selon les réglementations en place (Figure 69).

De plus, la répartition des usages est légèrement meilleure pour la règle a = 0,5 que pour les deux autres, car elle est sensiblement mieux équilibrée (Figures 70, 71 et 72).

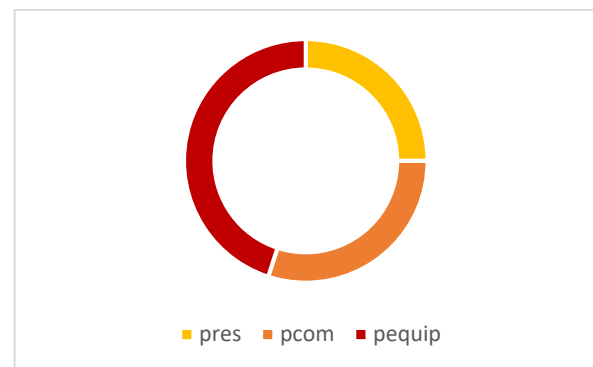


Figure-70: Répartition des usages, scenario 1 a =0.3

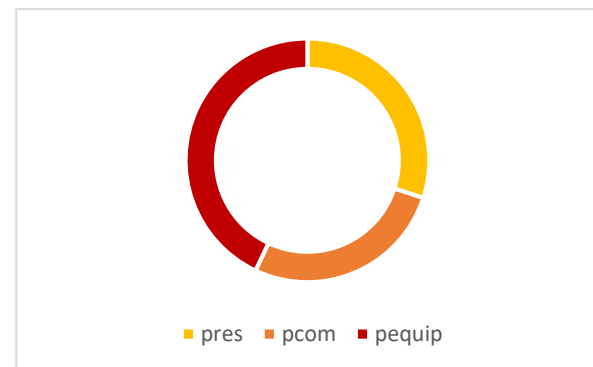


Figure-71: Répartition des usages, scenario 1 a =0.5

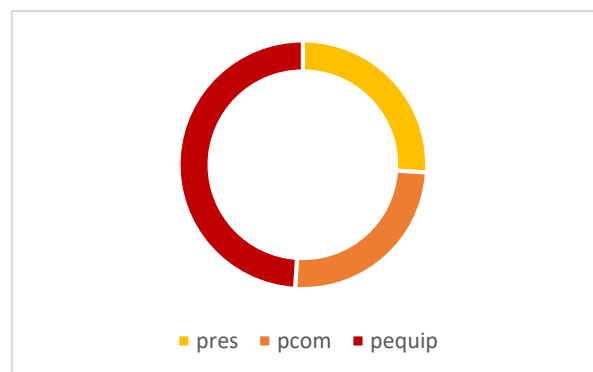


Figure-72: Répartition des usages, scenario 1 a =0.7

Nous pouvons donc conclure s'agissant de la répartition d'usages et du volume bâti, que le scenario 1 avec comme paramètre $a = 0.5$ semble être le plus performant des trois scenarios (Figure 73).

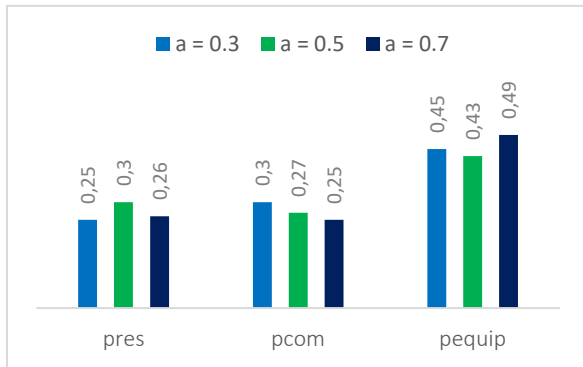


Figure-73: Répartition des usages, scenario 1

Cette meilleure répartition des usages pour le scenario avec $a = 0.5$ se traduit aussi par un meilleur indice de Shannon normalisé. En effet, avec un indice de 0.98, il est le meilleur des trois (Figure 74).

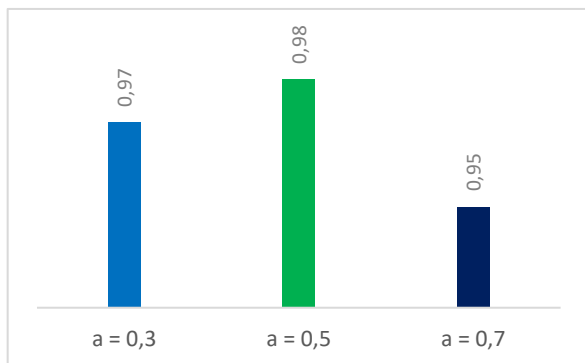


Figure-74: Indice de Shannon, scenario 1

Toutefois, il est important de noter que les trois règles testées ici donnent des résultats très satisfaisants avec un indice de Shannon supérieur à 0,95. Pour rappel, cela correspond à une mixité très élevée voire parfaite.

Il semble donc qu'une action sur l'un des usages soit assez efficace pour équilibrer leur répartition globale.

Cependant, nous remarquons que le seuil pour accéder à l'assouplissement d'ombre ($p(\text{res}) = 0.3$) est en moyenne non respecté. Une interprétation pourrait être la suivante : seuls les plus gros édifices mettent en œuvre la règle, ayant plus de volume constructible à gagner en s'y soumettant. La règle agit donc comme un critère d'activation non contraignant plus que comme un mécanisme de pilotage programmatique.

Ainsi, pour que la règle soit efficace, le paramètre a est à choisir avec beaucoup de précaution. Il doit, à la fois, favoriser suffisamment les bâtiments qui se soumettent à la règle pour les y inciter et ne pas augmenter sensiblement le volume bâti total, pour ne pas dénaturer la morphologie urbaine.

B – Deuxième scénario :

Pour rappel, le second scénario correspond à la formule suivante :

$$\begin{aligned} & \text{Seuil ombre arrangé} \\ &= \text{Seuil ombre standard} \\ & \quad * (1 + b * H_{norm}) \\ & \text{avec } b \in [0; 1] \end{aligned}$$

La règle a été testée avec différentes valeurs de b : 0,3 ; 0,5 ; 0,7 et 0,9. Nous obtenons les résultats suivants (Figure 75) :

| b | volume | pres | pcom | pequip | Hnorm |
|-----|--------|------|------|--------|-------|
| 0,3 | 13045 | 0,29 | 0,22 | 0,49 | 0,95 |
| 0,5 | 16989 | 0,28 | 0,22 | 0,5 | 0,94 |
| 0,7 | 17072 | 0,28 | 0,22 | 0,5 | 0,94 |
| 0,9 | 18154 | 0,29 | 0,23 | 0,48 | 0,96 |

Figure-75: Résultats scénario 2

Nous pouvons d’abord observer que cette nouvelle règle autorise un volume bâti bien supérieur au volume bâti actuel. En effet, les volumes bâtis obtenus sont 6% à 50% plus élevés que l’existant (Figure 76).

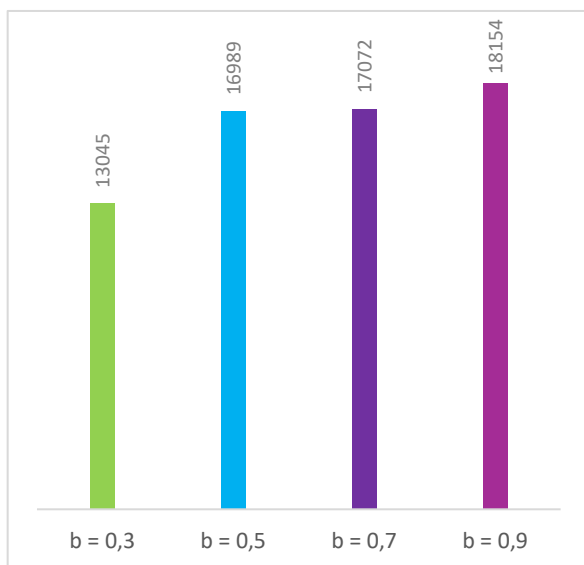


Figure-76: Volume bâtis, scénario 2

De plus, la répartition des usages est légèrement moins satisfaisante que pour la règle précédente. En effet, pour toutes les valeurs de b , la proportion d’équipement domine sur les deux autres usages.

De plus, malgré la prise en compte de la répartition des usages dans la formule même de la règle, elle semble globalement moins équilibrée. Ensuite, même en accordant plus de poids à l’indice de Shannon, avec $b = 0,9$ par exemple, la répartition qui en résulte n’est pas nettement meilleure (Figures 77, 78, 79, 80).

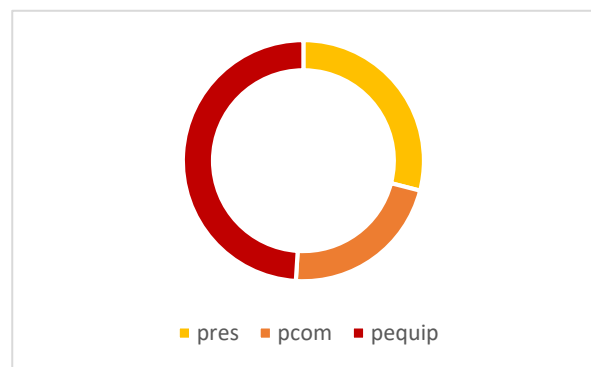


Figure-77: Répartition des usages, scénario 2, $b = 0,3$

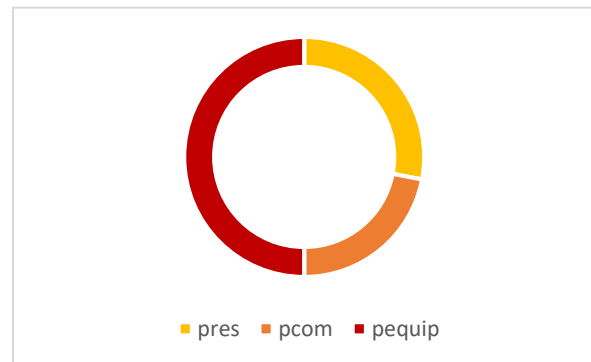


Figure-78: Répartition des usages, scénario 2, $b = 0,5$

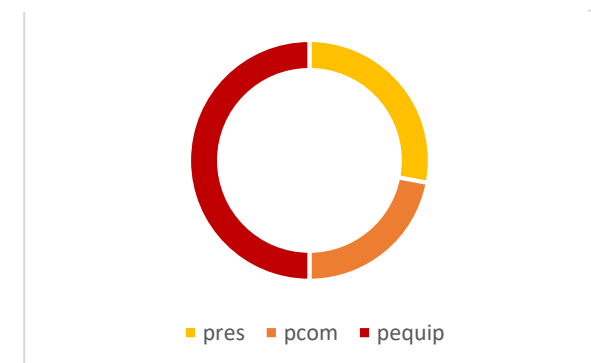


Figure-79: Répartition des usages, scénario 2, $b = 0,7$

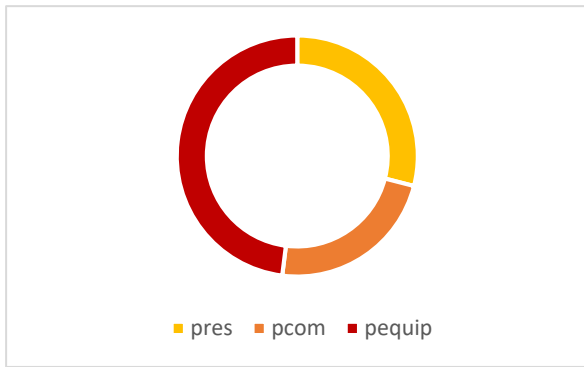


Figure-80: Répartition des usages, scenario 2, $b = 0,9$

Ainsi, nous n'observons pas de changement significatif dans la répartition des usages en faisant varier le paramètre b (Figure 81).

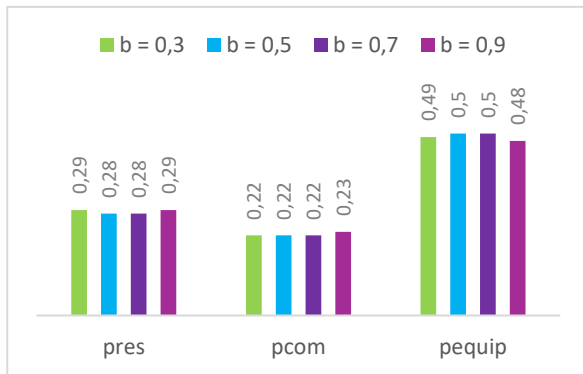


Figure-81: Répartition des usages, scenario 2

Toutefois, la répartition obtenue étant plutôt bonne, chacune des itérations de la règle obtient un très bon indice de Shannon (Figure 82).

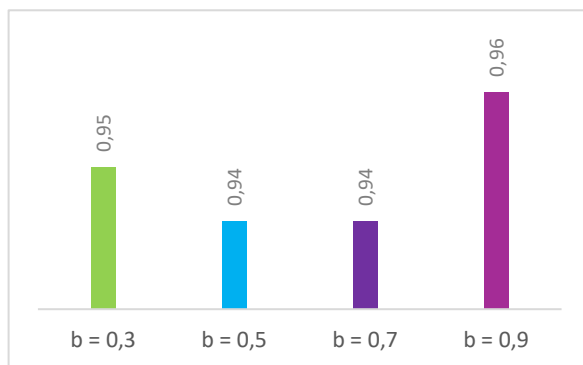


Figure-82: Indice de Shannon, scenario 2

Ces résultats montrent qu'une limite volumétrique stricte doit être fixée pour que la règle soit efficace. Sinon l'optimisation se

fait aux dépens de la maîtrise globale de la forme urbaine.

De plus, ils soulignent que l'indice de Shannon, seul, n'est pas garant d'une répartition égale des usages. Par exemple, la proportion d'équipement représente environ 50% des usages pour chacune des itérations, alors que les indices de Shannon obtenus sont excellents.

Ainsi, les proportions individuelles d'usages sont aussi à prendre en compte pour une compréhension plus complète de la situation urbaine.

5- PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

5.1 SYNTHÈSES DES SCÉNARIOS ET DE LEUR ÉVALUATION

Les scénarios testés dans cette étude nous permettent de tirer les conclusions suivantes pour l'élaboration de règles d'assouplissement.

En premier lieu, il est important de prendre en compte la morphologie globale souhaitée puis de définir un plafond volumique. En effet, sans ce plafonnement, les parcelles importantes polarisent les gains volumiques. Cela accentue les différences entre les bâtiments (*Figure 83*).

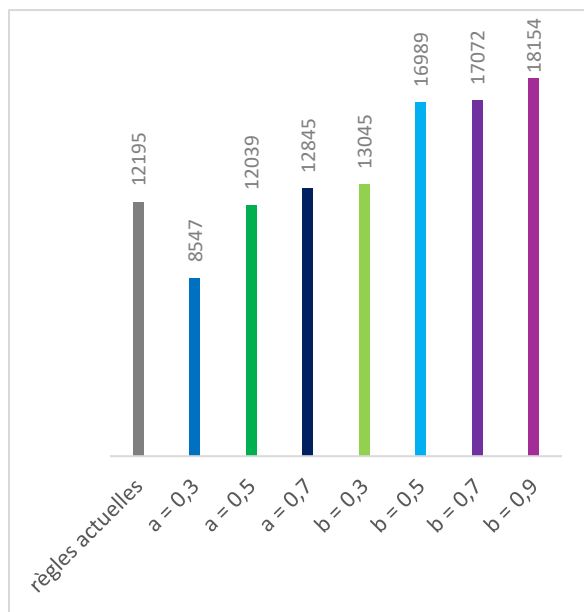


Figure-83 : volume bâti, règles actuelles, scénario 1, scénario 2

En deuxième lieu, les règles basées sur des seuils programmatiques ne sont pas assez contraignantes pour obtenir des résultats globaux. En effet, les parcelles les plus réduites, seront moins concernées par la réglementation car elles ont moins de volume total à y gagner. De même, ce type de règle

favoriserait majoritairement les parcelles les plus importantes (*Figure 84*).

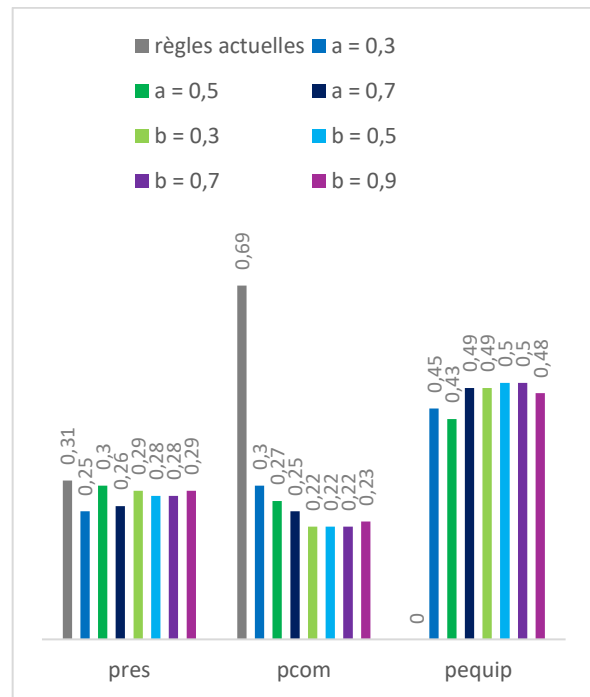


Figure-84 : répartition usages, règles actuelles, scénario 1, scénario 2

En troisième lieu, ces résultats mettent en valeur la limite des indices de mixité globaux. En effet, malgré les bons résultats affichés par ces derniers, la répartition peut ne pas être tout à fait équitable. Cela montre la nécessité d'intégrer d'autres indicateurs plus complets ou de les associer à des seuils minimaux pour chaque usage (*Figure 85*).

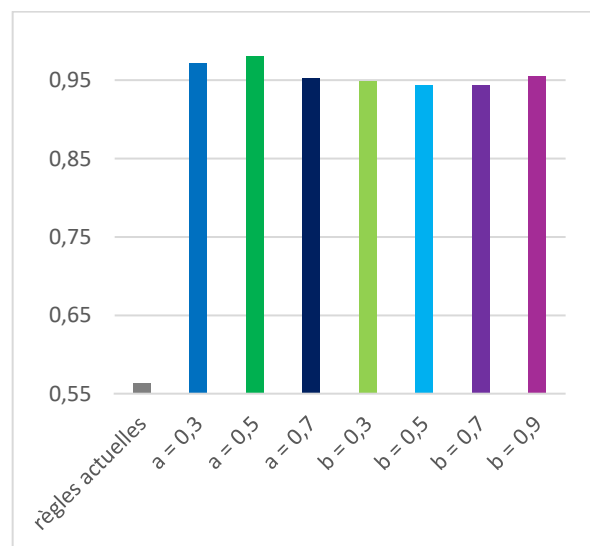


Figure-85 : indice de Shannon, règles actuelles, scénario 1, scénario 2

5.2 CONCLUSION SUR L'ENONCE D'UNE REGLEMENTATION EFFICIENTE

Cette recherche permet de comprendre que l'enjeu principal pour la formulation de réglementations urbaines efficaces repose en premier lieu sur la bonne appréhension de tous les paramètres clés qui influent sur la morphologie urbaine. Ainsi, dans le cas présenté ici, l'ensoleillement, le volume bâti et la mixité programmatique sont à prendre en compte.

En deuxième lieu, un des apports de cette recherche est de montrer que des règles fondées sur des seuils d'activation fixés pour un seul critère ne suffisent pas à garantir un résultat global pertinent. Il convient donc d'énoncer une règle pour chaque paramètre.

En troisième lieu, les réglementations doivent être pensées comme un système plus global, où tous les paramètres interagissent.

Enfin, une régulation urbaine doit pouvoir favoriser le développement de trajectoires morphologiques pertinentes, orienter durablement les transformations urbaines et permettre l'adaptation du patrimoine bâti dans un futur incertain.

5.3 APPLICATION POSSIBLE A D'AUTRES METROPOLES

Alors que cette recherche a été réalisée sur un quartier de Tokyo présentant une réglementation particulière, la méthodologie développée pourrait s'appliquer à d'autres grandes métropoles.

De nombreuses métropoles font aujourd'hui face à des problématiques comparables d'amélioration de la programmation fonctionnelle, d'accès à l'ensoleillement et d'adaptation des réglementations aux nouveaux besoins de la population, dans un contexte de transition écologique.

Les outils d'optimisation utilisés ici constituent des moyens d'exploration raisonnée de scénarii urbains et d'aide à la décision. En effet, la traduction de contraintes règlementaires en contraintes paramétriques et fonctions objectives permet d'étudier l'intérêt et les limites de nouvelles réglementations et d'en mesurer l'impact à court et moyen termes.

Cette approche ouvrirait des perspectives intéressantes pour les instituts de gouvernance urbaine. Elle pourrait devenir un outil d'aide à la décision pour les collectivités publiques, en identifiant les équilibres à trouver notamment entre ensoleillement, mixité et densité. Elle permettrait d'engager un dialogue efficace entre les urbanistes et les décideurs politiques, en appuyant les débats de simulations concrètes.

Enfin, cette recherche amènerait à repenser le rôle de la réglementation urbaine. En effet, dans un contexte de transition écologique, les réglementations ne doivent pas contraindre mais faciliter l'adaptation du patrimoine bâti aux nouveaux enjeux climatiques et aux besoins de la population.

RÉFÉRENCES

- A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore.* (s. d.). Consulté 26 septembre 2025, à l'adresse <https://ieeexplore.ieee.org/document/996017>
- A Hybrid Network/Grid Model of Urban Morphogenesis and Optimization.* (s. d.). ResearchGate. Consulté 13 juin 2025, à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/311926420_A_Hybrid_NetworkGrid_Model_of_Urban_Morphogenesis_and_Optimization
- A Study on Automatic Form Optimization Procedures of Building Performance Design Based on "Ladybug+Honeybee".* (s. d.). ResearchGate. Consulté 13 juin 2025, à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/343348302_A_Study_on_Automatic_Form_Optimization_Procedures_of_Building_Performance_Design_Based_on_LadybugHoneybee
- Arantes, L., Marry, S., Baverel, O., & Quenard, D. (2016). Efficacité énergétique et formes urbaines : Élaboration d'un outil d'optimisation morpho-énergétique. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27584>
- Azabudai Hills / Major Project / Mori Building Co., Ltd.* (s. d.). Consulté 23 avril 2025, à l'adresse <https://www.mori.co.jp/en/projects/toranom-on-azabudai/>
- Building Optimization through a Parametric Design Platform : Using Sensitivity Analysis to Improve a Radial-Based Algorithm Performance.* (s. d.). Consulté 10 octobre 2025, à l'adresse https://www.mdpi.com/2071-1050/13/10/5739?utm_source=chatgpt.com
- Building Standards Act—English—Japanese Law Translation.* (s. d.). Consulté 10 octobre 2025, à l'adresse <https://www.japaneselawtranslation.go.jp/en/laws/view/4024/en>
- Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A. (2020a). Computational design in architecture : Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>
- Caetano, I., Santos, L., & Leitão, A. (2020b). Computational design in architecture : Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>
- Carrion, M., & Arroyo, J. M. (2006). A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(3), 1371-1378. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.876672>
- Ciardiello, A., Rosso, F., Dell'Olmo, J., Ciancio, V., Ferrero, M., & Salata, F. (2020). Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design. *Applied Energy*, 280, 115984. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115984>
- Classification of urban morphology with deep learning : Application on urban vitality.* (s. d.). ResearchGate. Consulté 13 juin 2025, à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/354054024_Classification_of_urban_morphology_with_deep_learning_Application_on_urban_vitality
- Daniel, P. (2020). *PEDORTHIC INFORMATION MODELING*.
- Daniell, T. (2007). The Letter Of The Law : Constraints on architectural form in Japan. *Interstices: Journal of Architecture and Related Arts*, 85-90. <https://doi.org/10.24135/ijara.v0i0.333>
- Davis, D. (2011, octobre 16). *The MacLeamy curve*. Daniel Davis. <https://www.danieldavis.com/macleamy/>
- Deb, K. (2001). *Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Wiley, New York.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective

- genetic algorithm : NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
<https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Dogan, T., & Reinhart, C. (2017). Shoeboxer : An algorithm for abstracted rapid multi-zone urban building energy model generation and simulation. *Energy and Buildings*, 140, 140-153.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.030>
- Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort | Request PDF. (2025). *ResearchGate*.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003>
- Figure 2. MacLeamy's curve (2001) from Daniel Davis reprinted with... (s. d.). *ResearchGate*. Consulté 13 novembre 2025, à l'adresse
https://www.researchgate.net/figure/MacLeamys-curve-2001-from-Daniel-Davis-reprinted-with-permission-15_fig2_344630262
- Fleischmann, M., Feliciotti, A., & Kerr, W. (2022). Evolution of Urban Patterns : Urban Morphology as an Open Reproducible Data Science. *Geographical Analysis*, 54(3), 536-558.
<https://doi.org/10.1111/gean.12302>
- Generative methods for Urban design and rapid solution space exploration. (s. d.). *ResearchGate*. Consulté 18 juin 2025, à l'adresse
https://www.researchgate.net/publication/366246799_Generative_methods_for_Urban_design_and_rapid_solution_space_exploration
- Grasshopper Algorithmic Modelling : Parametric Design for Product Platform Customisation. (s. d.). Consulté 26 septembre 2025, à l'adresse
<https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/6243>
- https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=pmhr_2010. (s. d.). Consulté 9 octobre 2025, à l'adresse
https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=pmhr_2010
- https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/5026/5/Erratum_Dissaux%20Thomas%20-TFE.pdf. (s. d.). Consulté 31 mars 2025, à l'adresse
https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/5026/5/Erratum_Dissaux%20Thomas%20-TFE.pdf
- https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/toshiseibi/pdf_keikaku_chousa_singikai_pdf_keikaku_en_08. (s. d.). Consulté 13 juin 2025, à l'adresse
https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/toshiseibi/pdf_keikaku_chousa_singikai_pdf_keikaku_en_08
- Hurvich, C. M., & Tsai, C.-L. (1990). The Impact of Model Selection on Inference in Linear Regression. *The American Statistician*, 44(3), 214-217.
<https://doi.org/10.2307/2685338>
- Ibrahim, Y., Kershaw, T., Shepherd, P., & Elkady, H. (2022). Multi-objective optimisation of urban courtyard blocks in hot arid zones. *Solar Energy*, 240, 104-120.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.024>
- Jakubiec, J. A., & Reinhart, C. F. (2013). A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly Daysim simulations. *Solar Energy*, 93, 127-143.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.022>
- Jones, J. C., & Thornley, D. G. (1963). Conference on Design Methods. *Materials Relating to the 1962 Design Methods Conference*.
https://dl.designresearchsociety.org/design_methods_conference_1962/1
- Kawakami, M., Ohnishi, H., & Fujita, K. (2013). STUDY ON IMPACT BY SETBACK REGULATION AND HEIGHT CONTROL TO THE BUILDING ACTIVITIES OF MID-TO-HIGH-RISE BUILDING. *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, 78, 1981-1988.
<https://doi.org/10.3130/aija.78.1981>

- Kim, H.-J., Yang, C.-S., & Moon, H. J. (2019). A Study on Multi-Objective Parametric Design Tool for Surround-Type Movable Shading Device. *Sustainability*, 11(24), Article 24.
<https://doi.org/10.3390/su11247096>
- Kobayashi, M. (s. d.). *Règlement d'Urbanisme et Formes Urbaines à Tokyo*.
- Kudo, M., & Sklansky, J. (1997). A Comparative Evaluation of Medium- and Large-Scale Feature Selectors for Pattern Classifiers. *Kybernetika -Praha-*, 34.
- Larousse, É. (s. d.). *Définitions : Optimiser, optimiser - Dictionnaire de français Larousse*. Consulté 10 octobre 2025, à l'adresse
<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/optimiser/56254>
- Let There Be Light : Japan's Right to Sunlight*. (s. d.). Consulté 10 octobre 2025, à l'adresse
<https://www.linkedin.com/pulse/let-light-japans-right-sunlight-james-jim-hoadley-t6sae>
- Liu, H., & Motoda, H. (1998). Feature Transformation And Subset Selection. *IEEE Intelligent Systems and their Applications*, 13(2), 26-28. IEEE Intelligent Systems and their Applications.
<https://doi.org/10.1109/MIS.1998.671088>
- Mandelker, D. R. (s. d.). *ZONING FOR MIXED-USE DEVELOPMENT*.
- Mathias, K., Whitley, D., Stork, C., & Kusuma, T. (1994). *Staged hybrid genetic search for seismic data imaging. 1*, 356-361 vol.1.
<https://doi.org/10.1109/ICEC.1994.349925>
- Miao, Y., Koenig, R., & Knecht, K. (2020). *The Development of Optimization Methods in Generative Urban Design : A Review*.
- Nguyen, A. T., & Reiter, S. (2015a). A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models. *Building Simulation*, 8.
<https://doi.org/10.1007/s12273-015-0245-4>
- Nguyen, A. T., & Reiter, S. (2015b). A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models. *Building Simulation*, 8.
<https://doi.org/10.1007/s12273-015-0245-4>
- On the Optimisation of Urban form Design, Energy Consumption and Outdoor Thermal Comfort Using a Parametric Workflow in a Hot Arid Zone*. (s. d.). ResearchGate. Consulté 13 juin 2025, à l'adresse
https://www.researchgate.net/publication/353001286_On_the_Optimisation_of_Urban_form_Design_Energy_Consumption_and_Outdoor_Thermal_Comfort_Using_a_Parametric_Workflow_in_a_Hot_Arid_Zone
- Oxman, R. (2017). Thinking difference : Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, 52, 4-39.
<https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001>
- Pazos Perez, R. I., Carballal, A., Rabuñal, J. R., Mures, O. A., & García-Vidaurrázaga, M. D. (2018a). Predicting Vertical Urban Growth Using Genetic Evolutionary Algorithms in Tokyo's Minato Ward. *Journal of Urban Planning and Development*, 144(1), 04017024.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000413](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000413)
- (PDF) A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. (2024). ResearchGate.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>
- (PDF) Designing in complexity : Simulation, integration, and multidisciplinary design optimization for architecture. (2025). ResearchGate.
<https://doi.org/10.1177/0037549713482027>
- (PDF) *Review of parametric strategies for design optimization of built structure*. (s. d.). ResearchGate. Consulté 10 octobre 2025, à l'adresse
https://www.researchgate.net/publication/342775717_Review_of_parametric_strategies_for_design_optimization_of_built_structure
- Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 495-506.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003>

- R. M. Sakiyama, N., C. Carlo, J., Mazzaferro, L., & Garrecht, H. (2021a). Building Optimization through a Parametric Design Platform : Using Sensitivity Analysis to Improve a Radial-Based Algorithm Performance. *Sustainability*, 13(10), 5739. <https://doi.org/10.3390/su13105739>
- Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance : Archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49-59. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00079-8)
- Reinhart, C. F., & Walkenhorst, O. (2001). Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33(7), 683-697. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00058-5)
- Sanli, H. E., & Eldemir, F. (s. d.). *Spiral facility Layout Generation and Improvement Algorithm*.
- Sato, S., Otori, K., Takizawa, A., Sakai, H., Ando, Y., & Kawamura, H. (2002). Applying genetic algorithms to the optimum design of a concert hall. *Journal of Sound and Vibration*, 258, 517-526. <https://doi.org/10.1006/jsvi.5273>
- Shoiboxer : An algorithm for abstracted rapid multi-zone urban building energy model generation and simulation*. (s. d.). ResearchGate. Consulté 13 juin 2025, à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/313355174_Shoiboxer_An_algorithm_for_a_bstracted_rapid_multi-zone_urban_building_energy_model_generation_and_simulation
- Sketchpad. (2024). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Sketchpad&oldid=214172355>
- The Fight for Sunlight : How Japan's Laws Protect Your Right to Natural Light | E-Housing*. (s. d.). Consulté 13 juin 2025, à l'adresse <https://e-housing.jp/post/the-fight-for-sunlight>
- Times, H. Y. S. to T. N. Y. (1976, juillet 18). Japanese Courts Back the 'Right to Sunshine'. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/1976/07/18/archives/japanese-courts-back-the-right-to-sunshine-a-longtime-resident.html>
- Tokyo, urban design and mental health—Journal of Urban Design and Mental Health*. (s. d.). Centre for Urban Design and Mental Health. Consulté 13 juin 2025, à l'adresse <https://www.urbandesignmentalhealth.com/journal-3---tokyo-case-study.html>
- Topology optimization. Theory, methods, and applications. 2nd ed., corrected printing / Request PDF*. (s. d.). ResearchGate. Consulté 14 novembre 2025, à l'adresse https://www.researchgate.net/publication/268967189_Topology_optimization_Theory_methods_and_applications_2nd_ed_corrected_printing
- Turrin, M., Von Buelow, P., Kilian, A., & Stouffs, R. (2011, juillet 6). *Parametric modeling and optimization for adaptive architecture*. Proceedings of the 2011 eg-ice Workshop (eds. T. Hartmann, P. de Wilde and Y. Rafiq), 8 pp., University of Twente, The Netherlands, 2011.
- Turrin, M., von Buelow, P., & Stouffs, R. (2011). Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 656-675. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.009>
- Tzempelikos, A., & Athienitis, A. K. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, 81(3), 369-382. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.015>
- Vorlaender, M., & Summers, J. (2008). Auralization : Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123, 4028. <https://doi.org/10.1121/1.2908264>
- Waibel, C., Thomas, D., Elesawy, A., Hischer, I., Walker, L., & Schlueter, A. (2021). *Integrating energy systems into building design with Hive : Features, user survey and comparison with Ladybug and Honeybee tools*. 17, 1695-1702.

- <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30526>
- Wang, R.-C., & Liang, T.-F. (2005). Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning. *International Journal of Production Economics*, 98(3), 328-341. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.09.011>
- Wang, X., Mai, X., Lei, B., Bi, H., Zhao, B., & Mao, G. (2020). Collaborative optimization between passive design measures and active heating systems for building heating in Qinghai-Tibet plateau of China. *Renewable Energy*, 147, 683-694. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.031>
- Wang, Y., Guo, J., Jiang, Y., & Sun, C. (2024). Multi-objective optimization of buildings in urban scale for early stage planning and parametric design. *Sustainable Cities and Society*, 113, 105714. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105714>
- Watson, A. (2011). Digital buildings – Challenges and opportunities. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 573-581. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.07.003>
- Westermann, P., & Evins, R. (2019). Surrogate modelling for sustainable building design – A review. *Energy and Buildings*, 198, 170-186. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.057>
- Wortmann, T., Cichocka, J., & Waibel, C. (2022). Simulation-based optimization in architecture and building engineering— Results from an international user survey in practice and research. *Energy and Buildings*, 259, 111863. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111863>
- Wortmann, T., & Nannicini, G. (2017). Introduction to Architectural Design Optimization. In *Springer Optimization and Its Applications* (p. 259-278). https://doi.org/10.1007/978-3-319-65338-9_14
- Wu, C., Wang, J., Wang, M., & Kraak, M.-J. (2024). Machine learning-based characterisation of urban morphology with the street pattern. *Computers, Environment and Urban Systems*, 109, 102078. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2024.102078>
- Youns, A. M., & Grchev, K. (2024). A Historical and Critical Assessment of Parametricism as an Architectural Style in the 21st Century. *Buildings*, 14(9), 2656. <https://doi.org/10.3390/buildings14092656>
- Zhu, D., & Ooka, R. (2024). Spatiotemporal distribution of cooling effects from urban-scale rooftop mitigation strategies during high-temperature weather—A case study of the coastal Metropolis Tokyo. *Urban Climate*, 58, 102155. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102155>
- 渡部 宇子, & Watanabe, H. (2020). 建築物による日影が街区の日照環境に与える影響 : 建築物の高層化を踏まえた形態規制の定量的評価 [The University of Tokyo]. https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/records/2006307?utm_source=hatgpt.com
- 都市計画情報について | 都市計画情報 | 渋谷区ポータル. (s. d.). Consulté 29 mai 2025, à l'adresse https://www.city.shibuya.tokyo.jp/kankyo/oshikeikaku/keikaku-info/toshi_soudan.html