

Mémoire de fin d'études Proposition d'un outil méthodologique d'optimisation des plans à destination des bureaux d'architecture, basé sur l'intelligence artificielle et intégrant le critère environnemental de la lumière naturelle

Auteur : Lebrun, Laura

Promoteur(s) : Gardier, Patricia; Hallot, Pierre

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/25667>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Université de Liège, Faculté d'Architecture

Proposition d'un outil méthodologique d'optimisation des plans à destination des bureaux d'architecture, base sur l'intelligence artificielle et intégrant le critère environnemental de la lumière naturelle

Travail de fin d'étude présenté par Laura Lebrun en vue de l'obtention du grade de master en Architecture

Sous la direction de Patricia Gardier et Pierre Hallot

Année académique 2025-2026

TABLE DES MATIERES

Remerciements	4
Utilisation de l'intelligence artificielle dans le travail	5
Cadre éthique et institutionnel de l'intelligence artificielle.....	5
Table des abréviations.....	6
1. Introduction	7
2. Méthodologie	9
3. Etat de l'art.....	11
3.1. L'intelligence artificielle.....	11
3.2. L'optimisation.....	11
3.3. Intelligence artificielle et optimisation en architecture	12
3.4. Obstacles actuel de l'optimisation en architecture.....	14
3.5. Rationalisation et optimisation du plan : approche historique et analytique.....	15
3.6. Lumière naturelle : articulation entre performance environnementale et structuration morphologique	16
4. Méthodes contemporaines d'optimisation en architecture.....	19
5. Outils d'évaluation environnemental.....	26
5.1. Simulation environnementales et évaluation de la lumière naturelle	26
5.2. Approches paramétriques et méthodes computationnelles pour l'évaluation des performances en architecture	29
6. Logiciels d'optimisation intégrant l'intelligence artificielle.....	34
6.1. Panorama des logiciels existants et de la littérature associée	34
6.2. Analyse comparative des logiciels d'optimisation.....	37
6.3. Retour d'expérience de bureaux d'architecture	45

6.4.	Sélection des logiciels pour la phase expérimentale.....	47
7.	Phase expérimentale.....	49
7.1.	Présentation du cas d'étude.....	49
7.2.	Analyse environnementale du site d'étude	51
7.3.	Génération de variantes de plans d'implantation assistée par ia	65
7.4.	Evaluation et sélection des solutions optimales selon le critère de la lumière naturelle ...	71
7.5.	Conclusion de la phase expérimentale.....	76
8.	Conclusion et perspectives.....	79
	Bibliographie.....	81
	Sitographie.....	86
	Table des figures.....	88
	Annexes	89
	Annexes 1 : transcription interview uman	89
	Annexe 2 : transcription interview dgm.....	94
	Annexe 3 : analyse environnementale.....	104
	Annexe 4 : corpus des 9 variantes.....	115

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de ce mémoire marque la fin de mon parcours académique. Si ce travail a pu voir le jour, c'est grâce au soutien, aux conseils et à la présence des personnes qui m'ont accompagnée tout au long de ce parcours. Je tiens à leur exprimer toute ma gratitude.

Mes remerciements vont tout d'abord à mes promoteurs. Je remercie Patricia Gardier pour son encadrement, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail de fin d'études. Ses conseils et ses remarques ont permis d'orienter et de faire évoluer la réflexion développée dans ce mémoire. Je remercie Pierre Hallot pour ses conseils et son accompagnement au cours de ce travail. Ses retours et ses observations ont contribué à enrichir la réflexion et à approfondir certains aspects liés aux dimensions analytiques et expérimentales du sujet.

Je remercie mes lecteurs, Nicolas Seijkens et Frédéric Haesevoets, d'avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail.

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble des enseignants de la Faculté d'Architecture de Liège pour la qualité de la formation reçue et pour les connaissances transmises tout au long de mon parcours académique.

Je remercie les bureaux d'architecture ayant accepté de participer à cette recherche pour le temps qu'ils m'ont consacré ainsi que pour la richesse de leurs échanges, qui ont nourri ce travail.

Enfin, je tiens à remercier sincèrement ma famille et mes amis pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur présence tout au long de mes études, et plus particulièrement durant la réalisation de ce travail de fin d'étude.

UTILISATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LE TRAVAIL

Au cours de ce travail, l'intelligence artificielle a été mobilisée à différents niveaux selon sa nature et sa fonction dans le processus de recherche. Elle a tout d'abord été utilisée comme outil d'aide à la rédaction, afin de vérifier et d'améliorer la syntaxe de certains paragraphes. Dans ce cadre, son utilisation reste limitée à des fonctions d'assistance rédactionnelle. Par ailleurs, des outils de traduction automatique, tels que DeepL et Google Traduction, ont été ponctuellement utilisés pour la compréhension de documents rédigés dans des langues autres que le français, notamment en anglais. Enfin, l'intelligence artificielle constitue également un élément central du présent travail, puisqu'elle est mobilisée dans un cadre méthodologique et expérimental lié à la génération et à l'analyse de solutions architecturales. Elle intervient ainsi comme outil d'aide à la recherche et à l'expérimentation, en cohérence avec la problématique de ce travail de fin d'étude

CADRE ETHIQUE ET INSTITUTIONNEL DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'intégration de l'intelligence artificielle dans les pratiques professionnelles et académiques soulève des enjeux éthiques qu'il convient de prendre en considération, même s'ils ne sont pas développés au cœur de ce travail de fin d'études. La charte de l'Université de Liège souligne à cet égard l'importance d'un usage « réfléchi, responsable, critique et transparent » de ces outils, tout en rappelant que l'utilisateur conserve l'entière responsabilité des productions générées (Université de Liège, 2023). Cette approche s'inscrit dans une dynamique plus large portée par le cadre réglementaire européen, qui vise à encadrer le développement de l'intelligence artificielle afin de garantir le respect des droits fondamentaux ainsi que des exigences de fiabilité, de sécurité et de supervision humaine (Union européenne, 2024). Dans ce contexte, les outils proposés doivent être envisagés comme un support d'aide à la décision et non comme un dispositif autonome, impliquant une interprétation critique des résultats produits.

TABLE DES ABREVIATIONS

ADO	Optimisation à conception architecturale
BIM	Building Information Modeling (modélisation des Informations du bâtiment)
FAR	Floor Area Ratio (coefficient d'occupation des sols)
FSI	Floor Space Index (indice de surface de plancher)
GANs	Generative Adversarial Network (réseau antagoniste génératif)
GSI	Ground Space Index
IA	Intelligence artificielle
PES	Potentiel d'énergie solaire
UDI	Useful Daylight Illuminance
VAEs	Variational Auto-Encoders (auto-encodeurs variationnels)
VSC	Vertical Sky Component

1. INTRODUCTION

L'évolution des technologies a favorisé la généralisation des outils numériques dans la vie quotidienne. Dans le secteur architectural en particulier, les outils de conception numérique sont désormais solidement intégrés à la majorité des processus de conception (Ceylan et al., 2024). Dans ce contexte d'innovation numérique et d'émergence de nouvelles formes d'intelligence en architecture, l'optimisation de la conception architecturale (ADO) a gagné en importance ces dernières années. On note une augmentation significative des publications sur l'optimisation dans le domaine du bâtiment depuis 2005 qui témoigne de l'intérêt croissant pour ces techniques au sein des communautés de recherche en architecture (Nguyen et al., 2014). Ces technologies ont permis d'accélérer les processus de conception tout en améliorant la précision et les performances des bâtiments (Wortmann et Nannicini, 2017). Si ces avancées bénéficient aux pratiques architecturales en général, leur mise en œuvre concrète varie fortement selon l'échelle et les ressources des structures concernées.

Dans le contexte actuel de transition écologique, la conception architecturale doit intégrer très tôt des critères environnementaux tels que l'orientation, l'éclairage naturel, la ventilation et la performance énergétique afin d'optimiser à la fois le confort des occupants, la durabilité des bâtiments et l'efficacité économique. La lumière naturelle constitue à cet égard un critère clé : elle réduit la consommation d'électricité pour l'éclairage artificiel, améliore le confort et le bien-être des habitants, et contribue à diminuer les coûts énergétiques et la valeur des équipements complémentaires (Bashir et al., 2024). Cependant, ces critères sont souvent considérés tardivement, limitant leur impact potentiel. Les travaux de Stanislas Chaillou apportent une contribution précieuse : dans *Artificial Intelligence and Architecture: From Research to Practice* (2022), il propose des métriques architecturales (forme, connectivité, circulation) qui permettent de classer et d'analyser systématiquement des plans via des techniques d'intelligence artificielle. De plus, dans *L'intelligence artificielle au service de l'architecture* (2021), il démontre comment des réseaux antagonistes génératifs (GAN) peuvent produire des variantes de plans et prédire leur performance énergétique. Tütüncüler et Hoplamaz (2025) montrent que cette approche réduit significativement la charge de travail des architectes et accélère le processus de conception, tout en fournissant des résultats sensibles aux contraintes environnementales. Également en Belgique, les chercheurs soulignent que malgré les progrès de la conception environnementale au fil des décennies, l'utilisation des outils numériques pour optimiser les performances environnementales reste fragmentaire dans la pratique architecturale, en raison de l'absence de protocoles clairs et partagés (Simoens et al., 2023). Ce manque de documentation rigoureuse et de normalisation des méthodologies constitue un frein à la diffusion : sans référentiels ni études de cas bien

validés, les architectes hésitent à adopter ces méthodes dans leur pratique quotidienne. Sur cette base, ce travail de recherche vise à développer un outil méthodologique d'optimisation des plans, plus précisément des plans d'implantation de bâtiments, en phase d'esquisse, c'est-à-dire à un stade précoce du processus de conception, en intégrant notamment la lumière naturelle comme critère environnemental. Il s'appuie sur des approches expérimentales issues de travaux récents en optimisation générative appliquée à l'architecture.

2. METHODOLOGIE

La méthodologie adoptée pour ce mémoire repose sur une approche progressive, combinant analyse théorique, recueil d'informations professionnelles et expérimentation pratique, afin de développer un outil méthodologique d'optimisation des plans intégrant la lumière naturelle comme critère environnemental.

Dans un premier temps, une analyse de la littérature et des outils existants sera menée, en examinant les travaux déjà réalisés autour de l'optimisation de plans. Cette étape permettra de recenser les méthodes et outils utilisés, ainsi que les résultats obtenus, tout en identifiant les difficultés, notamment en ce qui concerne l'intégration des critères environnementaux dès la conception architecturale.

Le critère environnemental retenu pour ce mémoire est la lumière naturelle (et qui sera également considérée comme un critère économique). La lumière contribue à réduire la consommation d'énergie liée à l'éclairage artificiel, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et réduisant les coûts pour les occupants. Elle influence également le confort des habitants, en favorisant le bien-être, la santé et la productivité, et joue un rôle déterminant dans l'orientation et la disposition des pièces, ce qui a un impact direct sur l'optimisation des plans. Des méthodes d'évaluation précises seront définies afin de mesurer quantitativement l'apport lumineux dans les espaces et son effet sur la consommation énergétique.

La sélection des logiciels permettant l'optimisation de plans constitue la troisième étape de la méthodologie. Ces logiciels seront choisis et comparés selon plusieurs critères : leur conformité aux cadres éthiques et à la protection des données, la nécessité d'une formation préalable pour les utiliser, et le rapport entre leur coût et les services qu'ils proposent. Cette analyse vise à identifier les outils les plus adaptés à la création d'une méthode reproductible.

Afin de compléter l'analyse, il est prévu de contacter des bureaux d'architecture utilisant ces logiciels. L'objectif est d'obtenir un retour d'expérience sur leur intégration dans la pratique architecturale. Les bureaux sélectionnés seront choisis selon leur engagement environnemental et l'utilisation de logiciels respectant des standards éthiques. Cette démarche offrira l'opportunité de mieux documenter l'optimisation numérique des plans, en valorisant et rendant accessibles des méthodes existantes, contribuant ainsi à leur diffusion et à leur adoption dans la pratique architecturale.

Les enseignements issus de la partie théorique de ce travail seront progressivement mobilisés pour orienter la méthodologie d'expérimentation, en définissant les éléments essentiels du processus d'optimisation et en constituant un cadre de référence pour la phase pratique. Cette mise en continuité assure une articulation cohérente entre la phase théorique et la phase expérimentale, en transformant les apports conceptuels en outils méthodologiques.

Enfin, la méthode développée sera testée puis évaluée à travers la conception d'un plan d'implantation en région liégeoise. Cette étape permettra d'évaluer la pertinence, l'efficacité et la reproductibilité de la méthode, tout en offrant un cas concret de son application dans un contexte réel. L'ensemble de cette démarche méthodologique vise ainsi à fournir un cadre structuré pour intégrer la lumière naturelle dans l'optimisation des plans, conciliant à la fois performance environnementale, confort des occupants et efficacité économique.

En conclusion, ce travail de recherche se présente également comme une notice d'aide à l'implémentation des méthodes d'optimisation destinées aux architectes. Il fournit un cadre pratique et structuré pour guider l'intégration de critères environnementaux, comme la lumière naturelle, dès la conception, contribuant ainsi à la diffusion et à l'adoption de pratiques architecturales plus performantes et responsables.

3. ETAT DE L'ART

3.1. L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'intelligence artificielle, définie comme « l'utilisation du cerveau humain comme modèle pour la logique de la machine », a été inventée en 1956 par le mathématicien et informaticien John McCarthy (cité dans Chaillou, 2019). Depuis sa création, l'IA a connu un développement considérable et s'est progressivement imposée dans différents domaines, y compris l'architecture. La Biennale de Venise 2025, intitulée « *Intelligence. Naturel. Artificiel. Collectif* », illustre parfaitement cet intérêt croissant, en mettant en avant la reconsidération des différentes formes d'intelligence en architecture, qu'elles soient naturelles, artificielles ou collectives, et souligne leur rôle central dans la conception contemporaine. (Biennale Architettura | 19th Exhibition, 2025).

L'IA permet d'automatiser des tâches telles que la génération de documents et de plans de construction, ce qui aide à réduire les erreurs, raccourcit les cycles de conception et libère les architectes de certaines tâches, leur permettant ainsi de se concentrer davantage sur la créativité des projets. Par ailleurs, l'IA aide à la prise de décision rapide en se basant sur des données et optimise les performances des bâtiments de manière continue et efficace (Li et al., 2025 et ; Nguyen et al., 2014).

3.2. L'OPTIMISATION

En 1948, le mathématicien américain George Dantzig a contribué de manière décisive au domaine de l'optimisation en créant la programmation linéaire. Cette approche repose sur l'idée que le désir humain de prendre les meilleures décisions possibles peut être formulé sous la forme d'un programme d'optimisation, qui peut ensuite être traité mathématiquement et informatiquement (Cichocka et Musikhina, 2014). Consécutivement, l'optimisation a trouvé son application pratique avec l'arrivée de l'ordinateur dans les années 1960 (Cherakaev, 2001, cité dans Cichocka et Musikhina 2014).

L'optimisation peut se définir comme l'art, la science et les mathématiques de sélectionner le ou les meilleur(s) élément(s) parmi un nombre fini ou infini d'alternatives disponibles, selon des critères spécifiés en amont. Elle trouve une application particulière dans le domaine de l'architecture, où elle permet de faciliter et résoudre des problèmes tels que l'apport de lumière naturelle, la circulation des plans d'étage, la circulation d'air, l'adaptation des projets aux

contraintes légales, la rentabilité, la consommation énergétique, la visibilité ; la combinaison de tous ces critères et bien d'autres. (Cichocka et Musikhina, 2014).

Pourtant, à l'origine, l'optimisation de la conception architecturale (ADO) demeure avant tout une sous-discipline de l'ingénierie, qui vise à analyser, améliorer et résoudre les défis liés aux structures architecturales, généralement en fin de phase de conception (Wortmann et Nannicini, 2017). Ce processus intègre diverses techniques, telles que les algorithmes génétiques, l'intelligence artificielle et d'autres approches algorithmiques (Cichocka et Musikhina, 2014). Toutefois, l'optimisation des performances reste le plus souvent du ressort des ingénieurs et a, jusqu'à présent, peu impliqué les architectes (Stals et al., 2016).

3.3. INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET OPTIMISATION EN ARCHITECTURE

Les défis sociaux, environnementaux et économiques contemporains se caractérisent par une interdépendance et une grande diversité : évolution des modes de vie, expansion urbaine, consommation croissante des ressources, contraintes économiques et exigence de qualité de vie. Face à cette complexité croissante, les architectes doivent identifier des solutions pertinentes en fonction d'un ensemble d'attributs et de contraintes définis, au sein d'un espace de conception qui excède souvent les capacités humaines, rendant la tâche de plus en plus ardue (Aleti et al., 2012). C'est dans ce contexte que l'optimisation devient ainsi un levier dans la pratique architecturale. Afin de répondre à ces enjeux, des outils avancés d'analyse et d'optimisation sont progressivement intégrés au processus de conception architecturale (Cichocka et al., 2015), afin d'éclairer les décisions face à un éventail toujours plus large d'options.

Aujourd'hui, l'application de l'optimisation en architecture présente de nombreux avantages, notamment en matière de réduction des coûts liés aux matériaux. En identifiant des solutions structurelles et topologiques performantes, il devient possible de réduire significativement la quantité de matière utilisée. Par exemple dans le contexte des méga-constructions, ces économies peuvent atteindre jusqu'à 50 % (Jaworski et Piasecki, 2009, cité dans Cichocka et Musikhina, 2014). Toutefois, les bénéfices de l'optimisation ne se limitent pas à l'efficacité matérielle : elle permet également d'améliorer la performance globale du projet, en équilibrant différents critères fonctionnels, environnementaux et esthétiques. Dans cette dynamique, la conception fondée sur la performance et la simulation s'impose comme une approche intégrée au processus de conception architecturale. Contrairement aux approches itératives traditionnelles, elle repose sur des modèles paramétriques et des outils de simulation permettant d'évaluer les performances des bâtiments, notamment en matière de consommation énergétique et de potentiel solaire (PES). Cette intégration de la simulation dans le processus de conception permet ainsi d'optimiser les projets en fonction d'objectifs variés, allant de contraintes précises à des

ambitions de performance globale (Wortmann et Nannicini, 2017 ; Zhang et al., 2024). Malgré ces potentialités, son usage dans le domaine architectural reste encore marginal et peu documenté, cette approche étant historiquement davantage mobilisée par les ingénieurs. Son adoption tend néanmoins à progresser, portée par l'évolution des compétences professionnelles et la généralisation des outils numériques (Wortmann et Nannicini, 2017).

Cette dynamique progressive d'adoption se reflète également dans l'enquête menée en 2014 par Bradner, Lorio et Davis auprès d'architectes et d'ingénieurs ayant déjà recours à des outils d'optimisation dans leurs projets. L'un des principaux constats de cette étude a été que les participants mobilisaient ces outils principalement dès les phases les plus précoces du processus de conception, permettant ainsi d'amorcer l'esquisse sans partir d'une page blanche. Cependant, ces recherches portent majoritairement sur l'enveloppe, l'orientation globale et la performance énergétique globale, et rarement sur la micro-échelle distributive.

Pour mieux comprendre les mécanismes d'optimisation mobilisés dans le cadre de la conception, il convient de distinguer deux grandes familles d'approches algorithmiques : les algorithmes mono-objectifs et les algorithmes multi-objectifs. Les approches mono-objectives visent l'identification d'une solution optimale selon un critère unique. Si elles simplifient la résolution du problème, elles impliquent toutefois une hiérarchisation préalable des priorités, ce qui peut limiter la flexibilité du processus de conception. À l'inverse, les approches multi-objectives prennent en compte plusieurs fonctions souvent contradictoires et produisent un ensemble de solutions optimales appelé front de Pareto. Le concepteur dispose ainsi d'un ensemble de solutions non dominées plutôt que d'une solution unique (Zhang et al., 2024). Cette approche est particulièrement adaptée aux projets architecturaux, qui impliquent souvent la conciliation de plusieurs paramètres tels que la performance énergétique, la qualité spatiale, les contraintes économiques et les exigences réglementaires (Wortmann et Nannicini, 2017).

Les recherches récentes explorent l'usage des réseaux neuronaux pour la génération de plans architecturaux. Nagy et al. (2017) montrent que des modèles d'apprentissage supervisé peuvent apprendre des distributions spatiales à partir de bases de données annotées. Ces approches déplacent la conception vers un paradigme probabiliste, dans lequel le plan devient une distribution apprise plutôt qu'un artefact déterministe. Toutefois, plusieurs limites persistent : les critères environnementaux ne sont généralement pas intégrés, les géométries produites sont plausibles mais non optimisées, et l'interprétabilité des modèles reste limitée.

Dans cette continuité, les travaux récents de Zeshan et Dickinson (2024) montrent que les outils génératifs fondés sur l'IA peuvent produire des variantes de plans ou de volumes à partir de

critères prédéfinis. Dès lors, la question ne se limite plus à savoir si l'IA remplacera le concepteur, mais concerne plutôt la manière dont elle s'intègre dans la chaîne décisionnelle du projet. L'architecte devient alors un méta-designer, à la fois entraîneur et évaluateur du système, orientant l'algorithme vers des solutions porteuses de sens, de confort et de qualité spatiale.

Enfin, l'optimisation en conception architecturale doit être envisagée de manière interdisciplinaire, mobilisant notamment les mathématiques, l'informatique, la conception structurelle, la simulation ainsi que le calcul différentiel et intégral (Canestrino, 2021).

3.4. OBSTACLES ACTUEL DE L'OPTIMISATION EN ARCHITECTURE

L'application de l'optimisation dans la conception architecturale se heurte encore à plusieurs obstacles majeurs, tant sur le plan technique que méthodologique. Tout d'abord, la complexité du processus d'optimisation découle de deux sources principales : d'une part, il est souvent difficile de définir clairement les variables de décision, les objectifs à atteindre et les contraintes à respecter ; d'autre part, même lorsque ces éléments sont identifiés, ils ne peuvent pas toujours être formulés sous une forme mathématique directement exploitable par les algorithmes (Wortmann et Nannicini, 2017). À cela s'ajoute une difficulté d'ordre pratique : pour intégrer ces outils dans leur processus de travail, les architectes doivent souvent acquérir des compétences en programmation (Cichocka et Musikhina, 2014). Le manque d'interfaces utilisateurs accessibles constitue un frein supplémentaire, limitant l'adoption de ces approches dans la pratique courante (Bradner et al., 2014). Cette évolution tend à éloigner progressivement le métier d'architecte de son rôle de concepteur au profit d'une posture plus technique. Par ailleurs, l'usage actuel de ces outils reste majoritairement exploratoire : les professionnels les mobilisent surtout pour générer et comparer différentes options de conception, plutôt que pour aboutir à une solution optimale unique (Bradner et al., 2014). Un obstacle majeur réside dans l'absence de documentation approfondie sur les applications concrètes de l'optimisation en architecture. Les études de cas détaillées et les analyses empiriques sont rares, laissant les praticiens sans repères méthodologiques clairs. Cette carence les oblige soit à consacrer un temps considérable à l'expérimentation, au détriment de l'efficacité du processus, soit à renoncer à l'usage de ces outils (Li et al., 2025).

Singh et Kensek (2014) relèvent que seuls trois outils de conception architecturale sont accessibles au public : Grasshopper, Dynamo Studio et DesignBuilder. Ils combinent à la fois la simulation de performance et l'optimisation dans une interface graphique intuitive, sans exiger de compétences en programmation. Cette accessibilité technologique pourrait en théorie favoriser

une adoption large, mais dans les faits, son utilisation reste concentrée dans de grandes agences, mieux dotées en compétences humaines et techniques. À l'inverse, dans des contextes professionnels plus modestes notamment en Europe, et particulièrement en Wallonie l'implémentation de telles pratiques demeurent rares. Plus de la moitié des bureaux y comptent moins de cinq architectes, travaillant majoritairement sur des projets à budgets restreints, ce qui limite considérablement leurs capacités à intégrer des outils d'optimisation avancés (Stals et al., 2016).

3.5. RATIONALISATION ET OPTIMISATION DU PLAN : APPROCHE HISTORIQUE ET ANALYTIQUE

L'optimisation des plans architecturaux s'inscrit dans une tradition analytique ancienne, bien antérieure aux approches computationnelles contemporaines. Dès les années 1920, l'architecte Alexander Klein développe une méthode d'évaluation fonctionnelle des plans de logements collectifs, fondée sur des critères objectivables tels que la compacité, l'organisation des circulations, la séparation entre espaces de jour et de nuit ou encore l'efficacité distributive (Koch, 2016). Entre 1927 et 1928, anticipant le deuxième Congrès internationaux d'Architecture Moderne de 1929, il publie des diagrammes représentant les déplacements des habitants à l'intérieur des appartements sous forme de flux. Ces diagrammes servent de base à la conception des plans, envisagés comme des systèmes permettant l'organisation scientifique de la vie domestique. Les aspects constructifs et matériels passent ainsi au second plan : l'étude se concentre sur une organisation spatiale idéale, où l'efficacité des activités domestiques dépend directement de la configuration de l'espace. Klein prend également en compte d'autres paramètres, tels que l'accès à la lumière naturelle et le positionnement du mobilier, qui guident la création de séries de plans diagrammatiques. Cette approche rend l'agencement des appartements paramétrique, avec plusieurs variantes possibles, contrairement à la majorité des propositions du CIAM de 1929 qu'il remet en question. Selon lui, la question de l'Existenzminimum (minimum d'existence) aurait dû être abordée non pas par des solutions fixes, mais par un ensemble de méthodes permettant de concevoir des logements optimisés et adaptables.

Cette démarche de rationalisation du projet architectural s'inscrit dans une volonté plus large de considérer le plan comme un système spatial structuré pouvant être analysé de manière objective. Dans cette perspective, les recherches sur la morphologie urbaine ont contribué à structurer l'analyse de la forme du cadre bâti à partir de ses composantes fondamentales réseaux viaires, parcelles et bâtiments permettant d'étudier la structure spatiale de manière systématique (Vernez Moudon, 1994). Parallèlement, la théorie de la Space Syntax développée par Bill Hillier et Julienne

Hanson introduit des outils quantitatifs permettant de mesurer les relations configuratives entre les espaces. Ces travaux montrent que la configuration spatiale influence les usages et les flux de déplacement au sein de l'environnement bâti (Hillier & Hanson, 1984).

Ces approches ont contribué à établir une compréhension analytique du plan architectural en tant que système mesurable et comparable. Toutefois, elles demeurent principalement évaluatives, dans la mesure où elles permettent d'analyser et de comparer des configurations spatiales existantes, sans pour autant générer automatiquement de nouvelles solutions de conception.

À partir des années 1970, les recherches sur la grammaire des formes introduisent une nouvelle manière de formaliser le processus de conception architecturale. Cette approche est développée notamment par George Stiny et James Gips (1971), qui proposent de décrire la composition architecturale comme un système de règles appliquées à des formes géométriques. Le principe consiste à définir une forme initiale et un ensemble de règles de transformation permettant d'ajouter, de subdiviser ou de modifier des éléments spatiaux. En appliquant successivement ces règles, il devient possible de générer différentes configurations formelles à partir d'un même système. Cette approche permet ainsi de formaliser certains processus de conception et de traduire des logiques architecturales en systèmes opératoires explicites (Stiny & Gips, 1971). Par la suite, ces travaux ont été approfondis afin d'analyser ou de reproduire des langages architecturaux spécifiques, notamment dans l'étude des villas de Andrea Palladio, montrant que certains styles architecturaux peuvent être décrits comme des systèmes de règles génératives (Stiny & Mitchell, 1978). Les grammaires des formes constituent ainsi une étape importante dans le développement des approches computationnelles en architecture, car elles ouvrent la possibilité d'une génération algorithmique des formes. Toutefois, ces méthodes restent généralement centrées sur la formalisation stylistique et n'intègrent pas intrinsèquement des critères de performance environnementale ou de qualité spatiale.

3.6. LUMIERE NATURELLE : ARTICULATION ENTRE PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE ET STRUCTURATION MORPHOLOGIQUE

La lumière naturelle est un élément central de la qualité des espaces bâtis, tant pour le confort visuel, la santé et le bien-être des occupants que pour la performance énergétique des bâtiments. Elle contribue à réduire la dépendance à l'éclairage artificiel et influence les apports et pertes thermiques passives, participant ainsi à la durabilité des constructions (Boyce, 2014 ; Reinhart & Wienold, 2011). Au-delà de ces aspects perceptifs et énergétiques, la lumière naturelle agit

également comme un facteur structurant de la morphologie des espaces, en conditionnant la profondeur des pièces, la distribution des ouvertures et l'organisation des circulations.

Historiquement, l'évaluation de la lumière naturelle reposait sur des indicateurs statiques, comme le Facteur de Lumière du Jour (FLJ ; Daylight Factor, DF), qui mesure le rapport entre l'éclairement intérieur et l'éclairement extérieur sous ciel couvert standard. Bien que simple à calculer, cette métrique ne prend pas en compte les variations saisonnières, horaires ou climatiques, ce qui limite sa pertinence pour évaluer la performance lumineuse annuelle d'un espace (Nabil & Mardaljevic, 2005).

Pour dépasser ces limites, la recherche a développé des indicateurs dynamiques et climatofondés. Le Daylight Autonomy (DA ; autonomie de la lumière du jour) mesure le pourcentage d'heures annuelles pendant lesquelles un espace atteint un niveau minimal d'éclairement naturel sans recourir à l'éclairage artificiel. Le Continuous Daylight Autonomy (cDA ; autonomie continue de la lumière du jour) permet d'observer la variation horaire de cette autonomie, offrant une vue plus précise sur la disponibilité réelle de la lumière. Le Spatial Daylight Autonomy (sDA ; autonomie spatiale de la lumière du jour) évalue la proportion de surface intérieure recevant le seuil minimal de lumière sur une part significative de l'année. Enfin, le Useful Daylight Illuminance (UDI ; éclairage utile de jour) identifie la quantité de lumière naturelle réellement utilisable, c'est-à-dire ni trop faible pour être efficace, ni trop forte pour provoquer l'éblouissement. Ces métriques sont calculées à partir de simulations climatiques horaires, intégrant l'orientation, la géométrie du plan et la profondeur des pièces, et permettent de relier directement la performance lumineuse aux caractéristiques morphologiques des espaces (Reinhart et al., 2006 ; Dervishaj & Gudmundsson, 2023).

Malgré la sophistication de ces outils, leur intégration dans le processus de conception architecturale reste limitée. Dans la pratique, les choix morphologiques majeurs : orientation, profondeur, disposition des pièces sont fixés dès l'esquisse, tandis que l'évaluation de la lumière naturelle intervient plus tard, en phase d'avant-projet sommaire (APS) ou de projet détaillé, lorsque les possibilités de modification sont déjà limitées. (Attia et al., 2012). Cette séparation entre conception spatiale et analyse environnementale limite la capacité des architectes à optimiser la morphologie des espaces dès les premières étapes.

Cette problématique est particulièrement manifeste dans les contextes de forte densité résidentielle. Des études sur les logements en Chine montrent que, malgré un potentiel élevé de lumière naturelle, de nombreuses unités ne respectent pas les seuils de performance recommandés, tels que le sDA et le UDI, en raison de contraintes réglementaires ou de choix morphologiques inadaptés (Hong et al., 2024). Ces résultats confirment que la lumière naturelle

est encore trop souvent utilisée comme paramètre de vérification a posteriori, plutôt que comme critère génératif structurant la morphologie des plans.

Ainsi l'intégration précoce de la lumière naturelle dès les premières phases ouvre la voie à des approches contemporaines combinant simulations climatiques, métriques dynamiques et intelligence artificielle, permettant de concevoir des plans optimisés qui prennent simultanément en compte la performance lumineuse, le confort visuel et l'organisation spatiale.

4. METHODES CONTEMPORAINES D'OPTIMISATION EN ARCHITECTURE

L'évolution des outils numériques et des méthodes computationnelles a profondément transformé les approches d'optimisation en architecture. Alors que les démarches analytiques traditionnelles permettaient principalement d'évaluer des solutions existantes, les approches contemporaines cherchent désormais à générer, simuler et comparer automatiquement un grand nombre de variantes de conception à partir de critères de performance multiples. L'intégration de l'intelligence artificielle, de la modélisation paramétrique et des simulations environnementales ouvre ainsi la voie à des processus de conception plus itératifs et exploratoires, capables de prendre en compte simultanément différents enjeux dès les premières phases du projet. Cette section présente plusieurs recherches illustrant ces évolutions méthodologiques, notamment à travers les travaux de Stanislas Chaillou, de D'Agostino et al. ainsi que de Chafik Mahaya.

Il est particulièrement pertinent de mobiliser les travaux de Stanislas Chaillou, dont l'ouvrage *L'intelligence artificielle au service de l'architecture* (2021) constitue une référence majeure. S'appuyant notamment sur sa thèse soutenue en 2019 à Harvard, dans laquelle il explore l'utilisation des GANs pour la conception de plans d'étage et de bâtiments entiers, Chaillou met en évidence le rôle structurant de l'IA dans l'évolution des pratiques architecturales.

L'intégration de l'IA conduit par ailleurs à l'émergence de nouvelles stratégies de conception. Comme le souligne Chaillou (2021), les avancées en IA impliquent une redéfinition du rôle de l'architecte ainsi que de ses interactions avec les outils numériques. Ces nouvelles stratégies de conception reposent notamment sur des méthodes d'optimisation capables de générer de manière ciblée des variantes de conception à partir de critères de performance quantifiables. Toutefois, ces méthodes présentent certaines limites, notamment en raison du caractère parfois peu original et répétitif des solutions produites, ainsi que des difficultés liées à leur intégration dans les processus de conception réels.

Les recherches de Chaillou se concentrent principalement sur les modèles génératifs, tels que les GANs (generative adversarial networks, réseau antagoniste génératif) et les VAEs (variational auto-encoders, auto-encodeurs variationnels), appliqués au « space layout problem » (problème d'aménagement de l'espace). Ce problème consiste à organiser un plan architectural en partitionnant un espace donné, généralement modélisé sous forme de polygone, tout en respectant les contraintes essentielles à sa viabilité, telles que la distribution fonctionnelle, la circulation ou encore l'accès à la lumière naturelle. Il s'agit d'un problème ancien en architecture, pour lequel aucune solution universelle n'a encore été trouvée (Chaillou, 2021). Dans ce cadre, il

identifie plusieurs caractéristiques fondamentales de la conception d'un plan, parmi lesquelles l'empreinte du bâtiment, le programme, la connectivité et la circulation.

Afin de répondre à cette problématique, Chaillou développe notamment l'approche ArchiGAN, dans le cadre de ses travaux de recherche à Harvard. Cette approche est fondée sur l'apprentissage à partir de bases de données d'images de plans d'appartements. Le modèle est entraîné à organiser les espaces au sein d'une emprise donnée, en respectant des contraintes telles que la position des ouvertures ou la distribution des pièces (Chaillou, 2021).

Dans cette continuité, Chaillou propose une interface (prototype interactif accessible en ligne) de génération de plans d'appartements (fig.1), dans laquelle l'utilisateur définit directement la forme de l'appartement et positionne les éléments structurants tels que les entrées et les fenêtres. Le système génère ensuite automatiquement des propositions d'aménagement cohérentes avec ces contraintes encodées. Dans la suite du processus, les solutions générées sont ensuite hiérarchisées à partir de critères architecturaux transformés en indicateurs quantifiables, regroupés autour de six dimensions : l'empreinte, le programme, l'orientation, l'épaisseur et la texture, la connectivité et la circulation.

Parallèlement, il développe une approche d'optimisation multicritères fondée sur des algorithmes génétiques. Celle-ci repose sur six critères d'évaluation : le respect des surfaces, l'éclairage naturel, la simplicité des formes, la convexité, le ratio de forme et la complexité globale (Chaillou, 2021). L'optimisation s'appuie sur le concept de front de Pareto, permettant d'explorer différents compromis entre ces critères. Les comparaisons entre plans conçus par des architectes et ceux générés par l'IA montrent que, bien que les premiers restent globalement supérieurs, les résultats de l'IA sont encourageants. Cette approche permet de produire plusieurs variantes parmi lesquelles un client peut effectuer un choix, avant que l'architecte n'approfondisse la solution retenue.

Un apport méthodologique majeur réside également dans la décomposition du processus de conception en étapes successives, chacune associée à un modèle GAN spécifique. Cette approche reprend les grandes phases du projet architectural, organisées selon la séquence : parcelle – programme- ameublement (Chaillou, 2021). Elle permet une intervention de l'utilisateur à chaque étape, celui-ci pouvant ajuster les résultats intermédiaires avant leur transmission à l'étape suivante, ce qui garantit le maintien du contrôle sur le processus créatif.

Chaillou met enfin en évidence l'importance croissante de l'évaluation quantitative des performances architecturales. Il souligne qu'il est aujourd'hui possible d'estimer de manière de plus en plus précise les performances d'une conception à partir d'un grand nombre d'indicateurs, et qu'il est essentiel de fournir un retour immédiat aux concepteurs (Chaillou, 2021). Dans ce contexte, la modélisation de substitution apparaît comme une méthode particulièrement

pertinente : elle consiste à reproduire le comportement de simulations complexes à l'aide de techniques de machine learning (apprentissage automatique) entraînées sur des jeux de données cohérents. Bien qu'ils ne remplacent pas les simulations physiques ou numériques de référence, ces modèles permettent d'obtenir des approximations rapides et fiables, facilitant la prise de décision en phase de conception. Cette approche est notamment illustrée par des outils tels que Spacemaker, permettant par exemple d'évaluer instantanément l'impact de la rotation d'un bâtiment sur l'apport en lumière naturelle. Chaillou souligne également l'émergence de nouveaux indicateurs de performance, notamment en matière d'efficacité énergétique, de durabilité et de faisabilité économique.

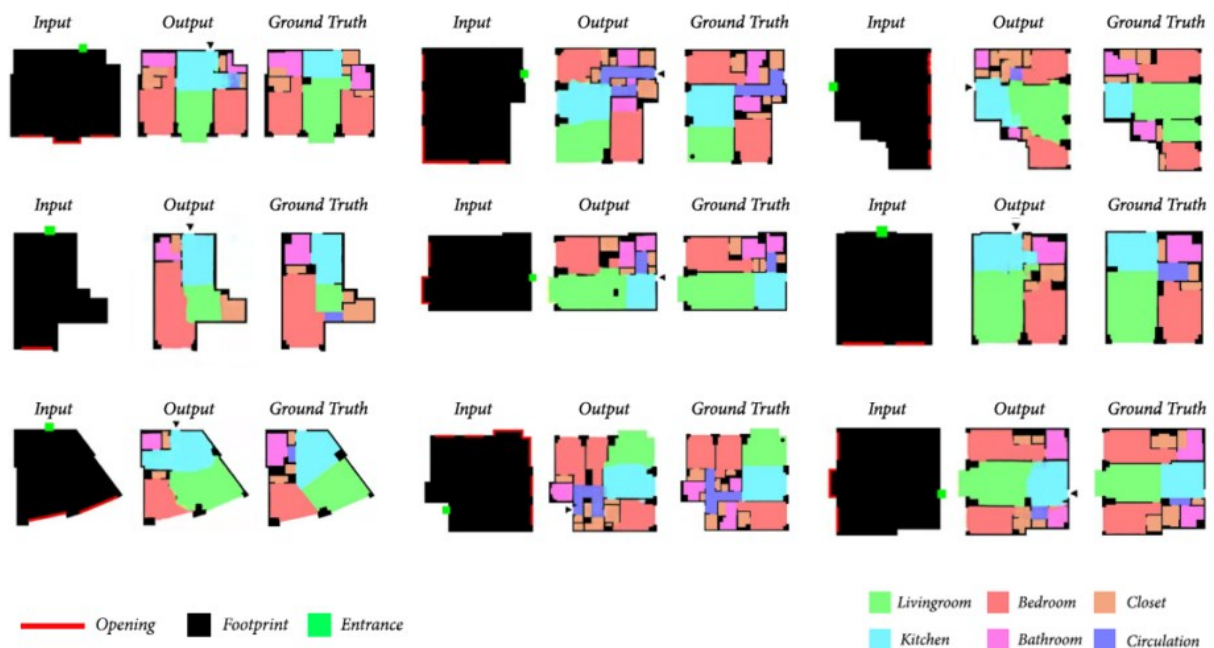


Figure 1 : input et output génération de plans d'appartements (Chaillou, 2019)

Ensuite, D'Agostino et al. (2021) ont développé un flux de travail de conception paramétrique et d'optimisation multi-objectifs visant à améliorer simultanément la performance énergétique et l'éclairage naturel des bâtiments dès les phases initiales de conception. Leur méthodologie combine la modélisation paramétrique avec Grasshopper, la simulation énergétique via EnergyPlus, l'évaluation de l'éclairage naturel avec Radiance/Honeybee, ainsi qu'une optimisation multi-objectifs basée sur un algorithme génétique (NSGA-II) implémenté dans MATLAB.

Cette approche a été appliquée à un bâtiment éducatif situé à L'Aquila (Italie), afin d'explorer les compromis entre performance énergétique, coût de construction et confort lumineux. Trois indicateurs principaux ont été analysés : les besoins énergétiques annuels (chauffage, climatisation, éclairage), le coût de construction et l'UDI 100–2000 lux, indicateur de confort lumineux basé sur l'éclairage naturel.

La modélisation paramétrique avec Grasshopper permet de générer rapidement différentes variantes en modifiant la forme du bâtiment ainsi que des paramètres tels que le ratio de surface vitrée par rapport à la surface de façade (WWR) et la profondeur des auvents. Les simulations associées évaluent la consommation énergétique et les conditions d'éclairage intérieur, permettant d'identifier les zones sous- ou sur-éclairées.

L'optimisation permet ensuite d'identifier les configurations les plus performantes selon plusieurs critères simultanés. Au total, 900 configurations ont été générées, aboutissant à 68 solutions optimales (front de Pareto), représentant les meilleurs compromis entre énergie, coût et confort lumineux. Les résultats mettent en évidence des arbitrages clairs : certaines solutions réduisent la consommation énergétique au prix d'un coût plus élevé, tandis que d'autres privilégient le coût au détriment de la performance énergétique.

Pour finir, le flux de travail intègre des interfaces de visualisation automatisées permettant de comparer les solutions optimales (Fig. 2). Ces outils facilitent la prise de décision en aidant architectes et décideurs à sélectionner la configuration la plus adaptée selon leurs priorités. L'approche de D'Agostino et al. illustre ainsi la capacité de la combinaison entre modélisation paramétrique, simulation et optimisation multi-objectifs à guider la conception vers des performances accrues dès les premières phases du projet.

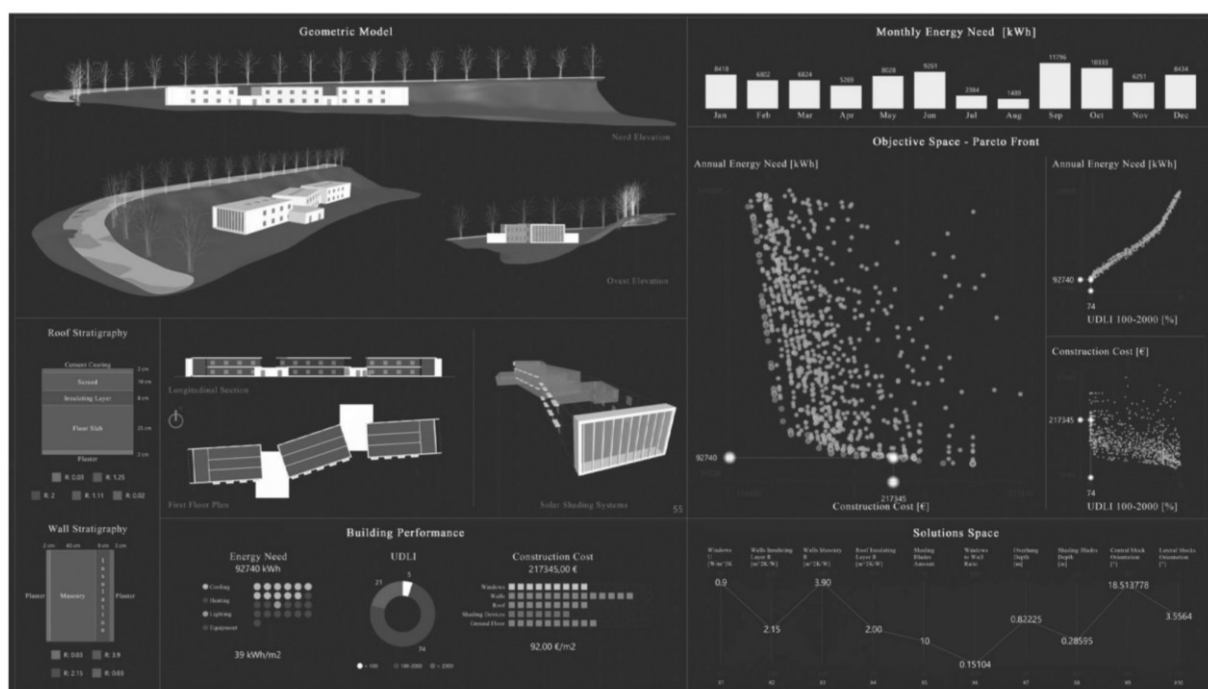


Figure 2 : Panneau de démonstration parmi les 68 exposés (D'Agostino et al., 2021)

Enfin dans sa thèse intitulée « Optimisation de la forme urbaine par l'évaluation du potentiel solaire », Chafik Mahaya (2014) met en évidence la complexité de l'adaptation des méthodes d'analyse du rayonnement solaire au contexte urbain, ainsi que la diversité des outils développés pour évaluer et quantifier le potentiel solaire des formes bâties. Il distingue principalement trois grandes familles d'approches : les méthodes issues des systèmes d'information géographique (SIG), celles basées sur l'analyse de la géométrie solaire, et celles intégrant des modèles de quantification énergétique et lumineuse, toutes fondées sur des modèles géométriques tridimensionnels. Ces approches sont mobilisées à la fois comme outils d'analyse et comme supports à la conception, dans une logique d'aide à la décision permettant d'orienter les choix morphologiques dès les premières phases du projet urbain.

L'apport central de cette recherche réside dans la mise en place d'une démarche expérimentale appliquée au cas du nouveau quartier administratif de la ville de Batna (Algérie). Cette expérimentation consiste à générer et comparer différentes formes urbaines selon leurs performances solaires, en mobilisant des indicateurs mesurables liés à l'ensoleillement, au rayonnement solaire et au potentiel de lumière du jour. À partir de cette base, une phase d'évaluation est structurée, permettant d'objectiver les performances des différentes configurations et de mettre en relation la morphologie urbaine avec son comportement énergétique. Cette étape conduit progressivement à une phase décisionnelle, dans laquelle les résultats des simulations servent de support à l'optimisation des formes urbaines, en identifiant les configurations les plus performantes selon les critères retenus (Mahaya, 2014).

Dans ce contexte, de nombreux logiciels disponibles sur le marché permettent d'analyser le comportement de la lumière et de l'énergie au niveau de l'enveloppe bâtie et offrent des outils d'évaluation adaptés. Toutefois, la plupart de ces logiciels sont payants et leurs versions d'essai restent limitées dans le temps (environ deux semaines). Parmi les outils les plus couramment utilisés figurent Ecotect, Radiance, Townscope, RETScreen, SVRArkitekto ainsi que Solene (Mahaya, 2014).

La démarche proposée (fig.3) s'inscrit ainsi dans une procédure itérative d'optimisation, où la forme urbaine est définie à partir de paramètres morphologiques tels que le rapport H/W (hauteur bâtiment/largeur de rue), l'orientation, l'inclinaison des toitures, ainsi que la forme et la densité bâtie. Ces paramètres font ensuite l'objet de simulations du potentiel solaire (solaire passif, actif, photovoltaïque et éclairage naturel), dont les résultats sont confrontés à des seuils de performance. Par ailleurs, l'analyse comparative des typologies urbaines (formes pavillonnaires, cour et tours) met en évidence une relation entre densité urbaine et viabilité du solaire passif : une compacité accrue entraîne une diminution des performances d'ensoleillement. Cela confirme ainsi

l'impact déterminant de la morphologie urbaine sur le potentiel solaire. L'ensemble de ces simulations est réalisé à l'aide du logiciel Solene, fondé sur un modèle thermo-radiatif permettant l'évaluation fine des interactions entre forme urbaine et rayonnement solaire (Mahaya, 2014).

Toutefois, Mahaya souligne que cette démarche reste essentiellement fondée sur des paramètres techniques, alors que les enjeux liés à l'énergie solaire dans l'aménagement urbain intègrent également des dimensions économiques et sociales, qui influencent directement les processus de décision. Enfin, il met en évidence les limites des outils existants, nombreux mais souvent coûteux, et dont les capacités de visualisation à l'échelle urbaine restent parfois restreintes, ce qui renforce l'intérêt d'une approche expérimentale comparative basée sur des typologies urbaines différenciées.

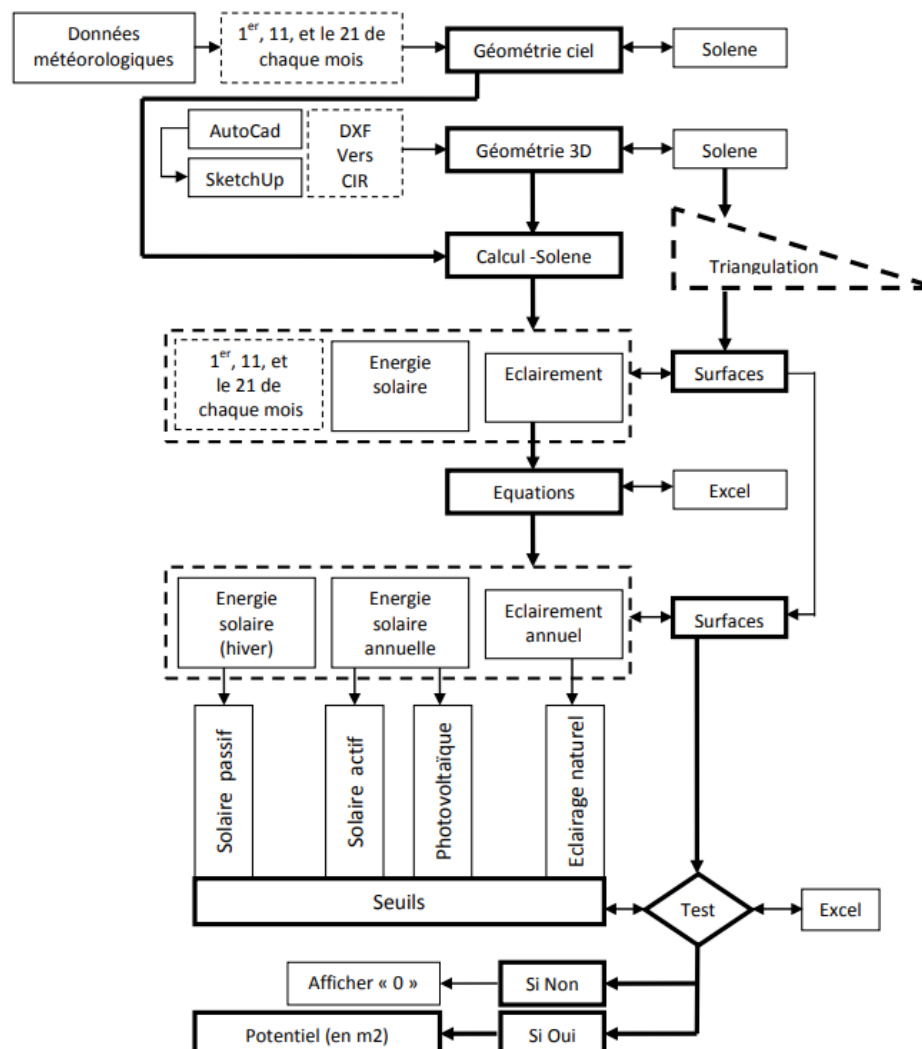


Figure 3 : Procédure d'optimisation retenue par Chafik Mahaya (2014)

En conclusion, la mise en regard des travaux de Chaillou, D'Agostino et al. et Mahaya met en évidence une transformation profonde des processus de conception architecturale, désormais structurés autour d'approches génératives, paramétriques et multicritères. Ces recherches montrent que les outils computationnels permettent d'explorer un espace de solutions beaucoup plus large qu'avec les méthodes analytiques traditionnelles, en intégrant dès les premières phases du projet des critères de performance variés, qu'ils soient énergétiques, spatiaux ou environnementaux.

Cependant, si ces approches enrichissent considérablement les capacités d'exploration et d'évaluation, leur intégration dans les pratiques opérationnelles de conception demeure encore partielle. Les travaux analysés soulignent ainsi des enjeux communs liés à l'interopérabilité des outils, à la lisibilité des résultats générés et à leur appropriation par les concepteurs.

Dans cette perspective, ces différentes contributions ouvrent la voie à une réflexion sur les dispositifs capables de rendre ces méthodes plus directement exploitables, notamment à travers des outils de simulation et d'évaluation environnementale. C'est dans ce cadre que s'inscrit la partie suivante, consacrée plus spécifiquement à la simulation de la lumière naturelle et à son rôle dans l'aide à la conception architecturale.

Ressources numériques : Les QR codes ci-dessous permettent d'accéder aux contenus mentionnés dans cette partie.



Interface -
Génération de plans
d'appartements,
Chaillou (2021)



Article scientifique -
Workflow d'optimisation
multi-objectifs
(CPDDO), D'Agostino et
al. (2021)



Thèse - Optimisation de
la forme urbaine par
l'évaluation du potentiel
solaire, Mahaya (2014)

5. OUTILS D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTAL

5.1. SIMULATION ENVIRONNEMENTALES ET ÉVALUATION DE LA LUMIÈRE NATURELLE

Dans une perspective d'optimisation des plans architecturaux intégrant les performances environnementales, et plus particulièrement la lumière naturelle, il est nécessaire d'examiner les outils existants permettant déjà l'évaluation de ces paramètres dans la conception. Cette analyse permet de situer les approches actuelles de simulation environnementale, principalement fondées sur des modèles physiques et déterministes, par rapport aux méthodes émergentes basées sur l'optimisation et la génération automatisée de solutions. Les outils présentés ci-dessous illustrent ainsi l'état actuel des pratiques en matière de simulation de la lumière naturelle et constituent une base de comparaison pour l'intégration future de méthodes fondées sur l'intelligence artificielle.

Un exemple d'outil de simulation de la lumière naturelle utilisé en architecture est le VELUX Daylight Visualizer. Il s'agit d'un logiciel de simulation numérique destiné à l'évaluation des conditions d'éclairage naturel dans les bâtiments, utilisé principalement en phase de conception afin d'analyser et de comparer différentes configurations spatiales avant la construction (VELUX Group, n.d.). Le logiciel permet d'estimer les niveaux d'éclairement naturel à l'intérieur d'un bâtiment et peut être mobilisé dans une logique d'optimisation des performances lumineuses. Il offre également une visualisation de l'ambiance lumineuse sous forme de rendus photoréalistes (fig. 4), tout en quantifiant et en spatialisant la distribution de la lumière. Enfin, il permet d'évaluer la perception de la lumière du jour selon différentes conditions de ciel (VELUX Group, n.d.). Ces principes sont issus des modèles de simulation radiométrique, largement validés dans la recherche en éclairage naturel (Reinhart & Andersen, 2006). Le VELUX Daylight Visualizer permet de quantifier plusieurs indicateurs utilisés en architecture pour évaluer la qualité de la lumière naturelle, notamment l'illuminance (lux), la luminance et le facteur de lumière du jour (daylight factor). Ces indicateurs sont utilisés pour comparer différentes variantes de conception et analyser l'impact des choix architecturaux sur les conditions lumineuses intérieures (VELUX Group, n.d.). D'un point de vue scientifique, la fiabilité des simulations réalisées par ce type d'outil a été étudiée dans le cadre de tests de validation standardisés. Les résultats du VELUX Daylight Visualizer ont notamment été comparés à des cas tests définis par la commission internationale de l'éclairage (CIE 171 : 2006), utilisés pour évaluer la précision des logiciels de simulation de lumière (Labayrade et al., 2009). Ces travaux montrent que le logiciel repose sur des méthodes de calcul physiquement cohérentes et comparables à d'autres moteurs de simulation utilisés en recherche. Dans le cadre de la conception architecturale, ce type d'outil s'inscrit dans une

approche de simulation environnementale fondée sur des modèles physiques. Contrairement aux outils récents basés sur l'intelligence artificielle ou l'optimisation générative, il ne génère pas automatiquement des solutions de conception, mais permet d'évaluer des scénarios définis par l'utilisateur. Il est ainsi principalement utilisé pour comparer différentes alternatives de projet selon des critères mesurables liés à la lumière naturelle, dans une logique d'aide à la décision en phase de conception initiale.

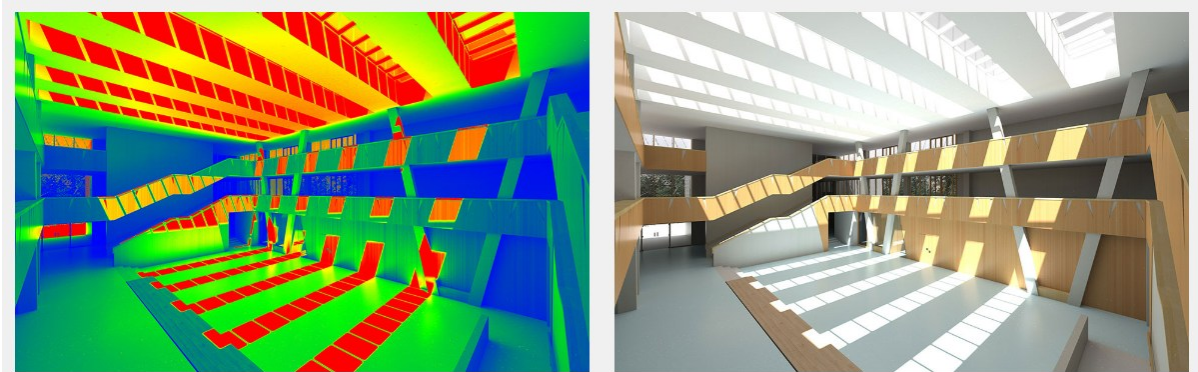


Figure 4 : Visualisation photoréaliste issue de velux (VELUX Group, n.d.)

Radiance est un outil avancé d'analyse et de simulation de la lumière utilisé en architecture et en ingénierie pour étudier les conditions d'éclairage dans des espaces bâtis. À partir de modèles géométriques en trois dimensions, il permet de calculer des résultats physiquement cohérents relatifs à la luminance et à l'éclairement, ainsi que de produire des visualisations sous forme d'images ou de représentations en fausses couleurs et iso-lignes, facilitant l'interprétation des résultats. Le logiciel est considéré comme une référence dans le domaine de la simulation de la lumière naturelle en raison de la précision de ses calculs et de sa flexibilité (Énergie +, s. d.). Radiance permet de simuler différents types de ciel, notamment le ciel clair, uniforme ou couvert, ainsi que des conditions plus complexes à l'aide du modèle de Perez, qui permet également de réaliser des simulations annuelles basées sur des données climatiques. Des extensions permettent en outre l'intégration de modèles de ciel définis par la CIE, ainsi que le calcul d'indicateurs complémentaires tels que les indices d'éblouissement. Il est utilisé aussi bien dans la recherche que dans la pratique professionnelle pour analyser le comportement de la lumière naturelle et artificielle dans des espaces avant leur construction, en prenant en compte des géométries complexes et des conditions d'éclairage variées (Énergie +, s. d.). Dans ce contexte, des outils plus récents comme ClimateStudio s'appuient directement sur le moteur de calcul de Radiance tout en proposant une interface plus intégrée et orientée vers la conception paramétrique. Ce type de plateforme permet de simplifier l'exploitation des simulations en les intégrant dans des

environnements de modélisation comme Rhino ou Grasshopper, facilitant ainsi leur utilisation dans des flux de travail de conception plus exploratoires et itératifs (ClimateStudio, s. d.).

De son côté, DIALux s'inscrit dans le développement d'outils de simulation permettant le calcul de l'éclairage naturel et artificiel dans les bâtiments. Il permet notamment de réaliser des calculs d'éclairement pour différents types de ciel, dont le ciel couvert CIE. Il peut être utilisé à différentes étapes du projet architectural, mais il est principalement adapté aux phases d'avant-projet en raison de son système de modélisation géométrique relativement simple. Les modèles peuvent être créés directement dans le logiciel ou importés à partir de fichiers CAO tels que DWG ou DXF (Énergie+, s. d.). Dans cette continuité, DIALux Evo constitue une évolution du logiciel initial, orientée vers la modélisation de bâtiments complets. Il permet de simuler des espaces allant d'une simple pièce à un ensemble de bâtiments dans un contexte plus large, et offre la possibilité de se positionner à différents endroits du modèle pour analyser les résultats des simulations. DIALux Evo permet de calculer à la fois l'éclairage naturel et artificiel, en intégrant différents types de ciel (clair, moyen ou couvert), ainsi que des indicateurs tels que l'éclairement et le facteur de lumière du jour. Par rapport à DIALux, cette version est plus complexe et s'adresse davantage à des concepteurs spécialisés en éclairage.

Ainsi, Radiance, DIALux et VELUX Daylight Visualizer s'inscrivent dans une même logique de simulation de la lumière naturelle et artificielle basée sur des modèles physiques, permettant d'analyser des scénarios définis par l'utilisateur. Ces outils se distinguent principalement par leur niveau de complexité et leur position dans le processus de conception : Radiance constitue un moteur de simulation avancé largement utilisé en recherche et en ingénierie, DIALux et DIALux evo proposent une interface intermédiaire orientée vers la conception d'éclairage dans des projets architecturaux, tandis que VELUX Daylight Visualizer offre une approche plus simplifiée adaptée aux phases initiales de conception. Sur le plan économique, ces outils se différencient également par leur modèle d'accès : Radiance et VELUX Daylight Visualizer sont accessibles gratuitement, tandis que DIALux est proposé en version gratuite avec des fonctionnalités avancées disponibles via des licences payantes. Dans l'ensemble, ces logiciels permettent d'évaluer et de comparer des solutions de conception selon des critères quantitatifs liés à la lumière naturelle. Ces outils reposent sur des modèles physiques et servent principalement à analyser des configurations définies par l'utilisateur, contrairement aux approches basées sur l'intelligence artificielle et l'optimisation générative, qui permettent aussi de produire automatiquement des solutions de conception.

5.2. **APPROCHES PARAMETRIQUES ET METHODES COMPUTATIONELLES POUR L'ÉVALUATION DES PERFORMANCES EN ARCHITECTURE**

Cette section examine les approches récentes d'analyse environnementale en architecture, en mettant en évidence l'intégration progressive de méthodes paramétriques et d'outils issus de l'apprentissage automatique dans l'évaluation des performances des bâtiments, notamment en ce qui concerne la lumière naturelle.

Le bureau d'étude indépendant Atmos Lab, spécialisé dans le design environnemental, adopte une approche critique de l'évolution de l'architecture contemporaine. Il souligne notamment que, depuis le début du XXe siècle, la performance énergétique des bâtiments repose de plus en plus sur des dispositifs techniques, traduisant une dépendance croissante de l'architecture vis-à-vis des systèmes automatisés pour assurer cette efficience (Atmos Lab, s. d.). Cette position traduit une volonté de replacer la conception architecturale au centre des enjeux environnementaux, en intégrant directement les performances énergétiques et le confort des occupants dans le processus de projet.

Dans cette perspective, Atmos Lab développe des solutions architecturales visant à optimiser simultanément plusieurs dimensions du projet, notamment le confort des usagers, la réduction des équipements techniques, la diminution de la consommation énergétique, la maîtrise des coûts d'exploitation et la réduction de l'impact environnemental global (Atmos Lab, s. d.). Il s'agit d'un bureau qui conçoit des approches de conception fondées sur la simulation environnementale, tout en évaluant des projets selon des critères physiques mesurables. Cette approche repose sur une logique de conception intégrée, dans laquelle les performances environnementales sont considérées dès les premières phases du projet et influencent directement les choix architecturaux.

Le bureau développe également des méthodologies et outils sur mesure en mobilisant des connaissances issues de disciplines complémentaires telles que la physique du bâtiment, la climatologie et la simulation environnementale. Cette démarche s'appuie sur l'analyse de plusieurs phénomènes physiques influençant la performance des bâtiments, notamment la lumière du jour, le rayonnement solaire, la ventilation naturelle, la température, le confort thermique et visuel, les consommations énergétiques, les émissions de carbone ainsi que la qualité des vues (Atmos Lab, s. d.). Elle s'inscrit dans les méthodes contemporaines d'évaluation environnementale des

bâtiments, qui visent à intégrer simultanément plusieurs indicateurs de performance dans la conception architecturale (Reinhart & Weller, 2016).

Pour mettre en œuvre ces analyses, Atmos Lab utilise notamment Ladybug Tools, un ensemble d'outils dédié à la simulation environnementale en architecture. Ladybug Tools permet d'exploiter des données climatiques afin d'évaluer les conditions d'un site et de simuler différents paramètres tels que l'ensoleillement, le rayonnement solaire ou le confort thermique. Il produit également des visualisations interactives facilitant l'interprétation des résultats et leur intégration dans le processus de conception. Ces outils sont largement utilisés dans des environnements de conception paramétrique tels que Grasshopper (Sadeghipour Roudsari & Pak, 2013). Ces outils s'inscrivent dans les approches de type *conception axée sur la performance*, dans lesquelles la forme architecturale est progressivement influencée par les résultats des simulations environnementales. Ce paradigme permet d'évaluer et de comparer différentes alternatives de conception selon des critères mesurables dès les premières phases du projet, en intégrant simultanément des dimensions énergétiques, climatiques et lumineuses.

Dans cette logique, la Maison Cépé (fig.5), conçue par le bureau d'architecture Adamo-Faiden et analysée par Atmos Lab dans le cadre d'une approche bioclimatique intégrée, constitue une application concrète de cette démarche. Le projet illustre la manière dont les simulations environnementales sont mobilisées comme outil de conception, afin d'orienter les choix architecturaux dès les premières phases du projet. L'étude porte notamment sur les interactions entre la forme du bâtiment et ses performances en matière d'ensoleillement, de ventilation et de confort thermique, permettant d'ajuster les décisions morphologiques à partir de critères environnementaux mesurés. La Maison Cépé met ainsi en évidence une approche dans laquelle la simulation ne se limite pas à l'évaluation d'un projet finalisé, mais participe directement à la définition et à l'optimisation de la forme architecturale dans une logique de conception bioclimatique.

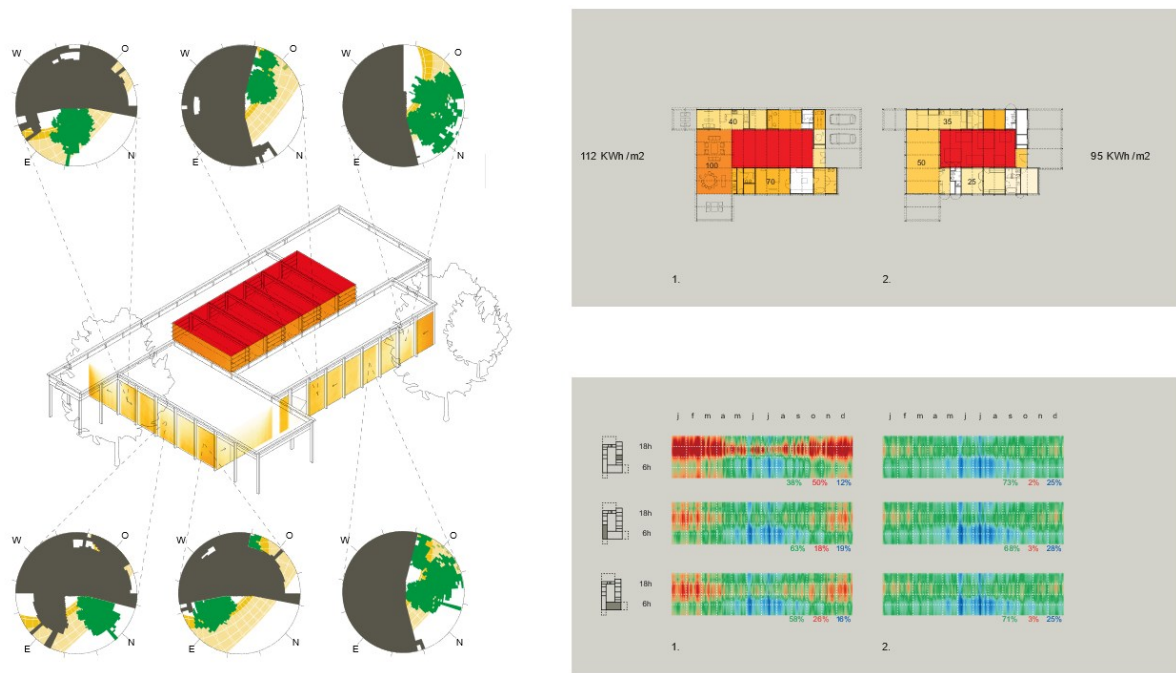


Figure 5 : Analyse de la maison Cépé (Atmos Lab, 2019)

Dans ce cadre, les limites des outils de simulation apparaissent particulièrement dans les phases amont de conception, où les itérations rapides sont essentielles. En particulier, les simulations d'éclairage naturel, bien qu'essentielles à l'évaluation des performances architecturales, restent coûteuses en ressources de calcul lorsqu'elles reposent sur des modèles physiques détaillés. C'est précisément dans ce contexte que les approches issues de l'apprentissage automatique viennent prolonger et accélérer les logiques déjà à l'œuvre dans des démarches comme celles d'Atmos Lab.

Lors des premières phases de conception architecturale, la morphologie du bâtiment et l'organisation du plan d'étage influencent directement ses performances en matière d'éclairage naturel. Toutefois, les simulations d'éclairage naturel basées sur des données climatiques sont souvent coûteuses en ressources de calcul, ce qui limite leur utilisation dans des processus de conception itératifs rapides. Dans ce contexte, les algorithmes de traduction d'image à image constituent une alternative prometteuse, les indicateurs d'éclairage naturel étant généralement représentés sous forme de grilles assimilables à des images bitmap. À ce titre, Jia (2021) propose l'utilisation du modèle *pix2pix* comme substitut aux simulations traditionnelles, permettant d'obtenir des résultats précis tout en réduisant significativement le temps de calcul. Par ailleurs, la constitution des données d'entrée nécessaires à ces analyses repose également sur la description du contexte bâti. Cette approche s'inscrit dans le prolongement direct des démarches de simulation environnementale : là où des outils comme Ladybug permettent d'évaluer physiquement des performances, les modèles comme *pix2pix* cherchent à approximer ces résultats par apprentissage statistique, afin de rendre ces évaluations compatibles avec des

processus de conception plus itératifs et exploratoires. Cette logique a été intégrée dans un outil développé sous Grasshopper, nommé ArchiGAN, et s'inscrit dans un flux de travail visant à prédire les performances d'éclairage naturel à partir de données générées par pix2pix (Jia, 2021). Des outils comme Urbano permettent ainsi d'extraire rapidement les hauteurs du bâtiment cible ainsi que celles des constructions environnantes, afin de reconstituer la géométrie de l'environnement urbain utilisé en amont des simulations et des modèles prédictifs. Dans ce cadre, la figure 6 illustre les résultats de simulation et de prédiction obtenus à partir de huit images d'entrée issues de l'ensemble de test, mettant en évidence la capacité du modèle à reproduire des estimations proches des résultats simulés.

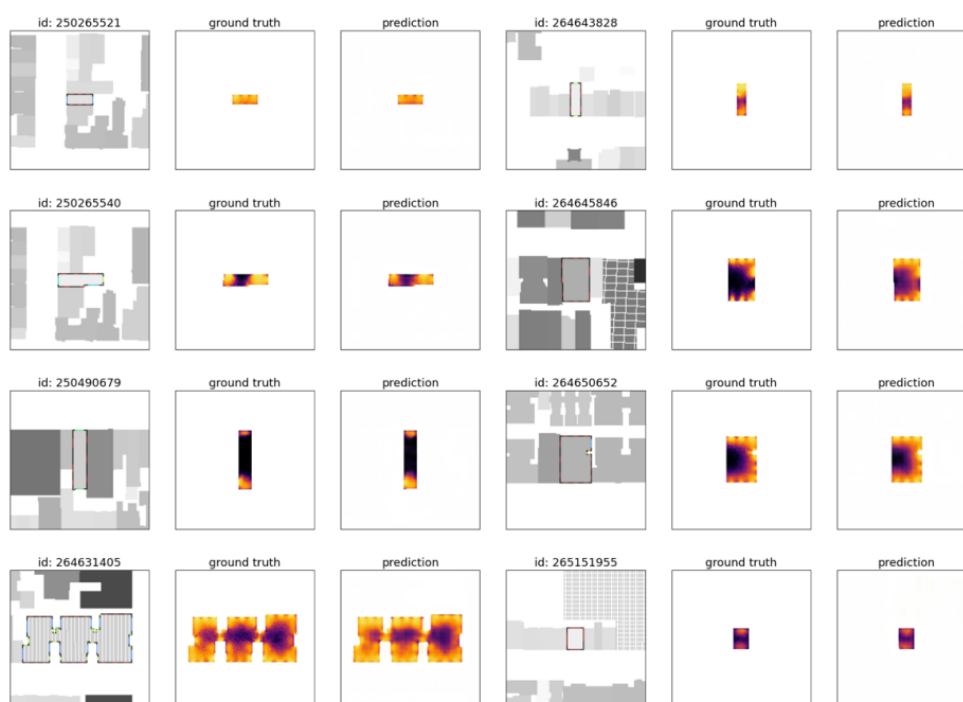


Figure 6 : Résultats de simulation et de prédiction de 8 images d'entrée issues de l'ensemble de test (Jia, 2021)

En résumé, cette section met en évidence une évolution progressive des méthodes d'évaluation environnementale en architecture, passant de simulations physiques détaillées vers des approches paramétriques et computationnelles de plus en plus assistées par l'intelligence artificielle. Ces outils permettent d'accélérer l'analyse des performances tout en ouvrant de nouvelles possibilités d'exploration en phase de conception, notamment pour l'évaluation de la lumière naturelle et l'intégration du contexte bâti.

Ressources numériques : Les QR codes ci-dessous permettent d'accéder aux contenus mentionnés dans cette partie.



Site internet -Atmos
Lab



Thèse – Jia Mian,
2021

6. LOGICIELS D'OPTIMISATION INTEGRANT L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

6.1. PANORAMA DES LOGICIELS EXISTANTS ET DE LA LITTERATURE ASSOCIEE

Cette section s'appuie sur une étude scientifique récente afin d'évaluer les performances des logiciels intégrant l'intelligence artificielle dans les processus de conception architecturale. L'objectif est de mettre en évidence les critères d'analyse relatifs à l'utilisation de ces outils dans le domaine de l'architecture.

Dans le cadre de la 10^e Conférence internationale sur les matériaux de construction et la construction, qui s'est tenue à Okinawa du 21 au 24 février 2025, ont été présentées les avancées récentes dans les domaines des matériaux de construction durables, des techniques constructives et de la conception architecturale. Les actes de cette conférence constituent à ce titre une référence pour les chercheurs, ingénieurs, architectes et professionnels du secteur de la construction souhaitant se tenir informés des évolutions et innovations du domaine (Hwee, 2025).

Dans ce cadre, une étude menée par Cortiços, Zheng et Duarte s'intéresse spécifiquement à l'intégration des outils d'intelligence artificielle dans les processus de conception architecturale, avec un accent sur les phases préliminaires et les enjeux de durabilité. L'objectif est d'évaluer la capacité de ces outils à accompagner les différentes étapes de conception tout en répondant aux Objectifs de Développement Durable (ODD) des Nations Unies ainsi qu'aux exigences des certifications environnementales et de qualité des bâtiments utilisés à l'échelle internationale telles que BREEAM, LEED et WELL (Hwee, 2025). La méthodologie qu'ils ont adoptée repose sur une approche séquentielle combinant analyses quantitatives et qualitatives. L'étude examine 32 outils d'IA à partir de 42 variables (fig.8), complétées par une analyse visant à contextualiser leur utilisation dans les domaines de l'architecture et de l'urbanisme. Cette double approche permet de comparer les outils selon différents critères, notamment leur performance et leur contribution à la durabilité des bâtiments (Hwee, 2025). Les outils analysés sont classés en cinq catégories principales : le marché, l'analyse automatisée du site, l'analyse de la performance des bâtiments, la conception architecturale et le développement du projet. Leur évaluation porte notamment sur leur capacité à générer des plans intégrés, à améliorer la visualisation via la modélisation 3D, le rendu et la réalité virtuelle, ainsi qu'à intégrer des stratégies de conception durable. Par ailleurs, l'étude identifie 11 critères clés pour l'évaluation des logiciels d'analyse automatisée de site. Parmi ceux-ci, certains présentent un intérêt particulier dans le cadre de ce travail, comme l'analyse solaire, permettant de simuler l'exposition au rayonnement et d'optimiser les apports en lumière naturelle ; l'analyse du potentiel d'éclairage naturel, visant à améliorer l'efficacité énergétique ; ainsi que l'analyse du potentiel solaire, estimant les possibilités d'intégration des énergies

renouvelables (Hwee, 2025). Enfin, les auteurs soulignent que les outils étudiés sont représentatifs du secteur mais ne couvrent pas l'ensemble du processus de conception architecturale, depuis les premières phases de projet jusqu'à l'obtention du permis de construire. Néanmoins, l'identification des logiciels les plus performants dans chaque catégorie constitue une base pertinente pour orienter le choix d'outils adaptés aux exigences contemporaines en matière de conception et de durabilité (Hwee, 2025).

Comme l'illustre la figure 7, la comparaison des outils d'intelligence artificielle selon les différentes catégories d'analyse permet d'identifier les solutions les plus performantes mises en évidence par l'étude. Dans la catégorie « marché », le logiciel Swapp se distingue avec le score le plus élevé, traduisant une meilleure couverture fonctionnelle par rapport aux autres outils évalués. Pour l'« analyse automatisée du site », Swapp et Spacio.ai obtiennent les meilleures performances ex æquo, confirmant leur efficacité dans les phases d'analyse initiale du site. Concernant l'« analyse des performances du bâtiment », Swapp et Cove.tool apparaissent comme les solutions les plus avancées, avec des résultats supérieurs aux autres plateformes. Dans la catégorie dédiée au « développement de l'architecture et de la conception », trois outils se démarquent de manière équivalente : Swapp, Spacio.ai et Autodesk Forma, illustrant une forte compétitivité sur les phases de conception et de développement architectural. Enfin, pour la catégorie « surplus », LookX présente la meilleure performance, même si les autres logiciels obtiennent des scores globalement équivalents.

Ces résultats mettent ainsi en évidence une hiérarchisation claire des outils selon leurs domaines de spécialisation, permettant d'identifier les solutions les plus adaptées à chaque étape du processus de conception architecturale.

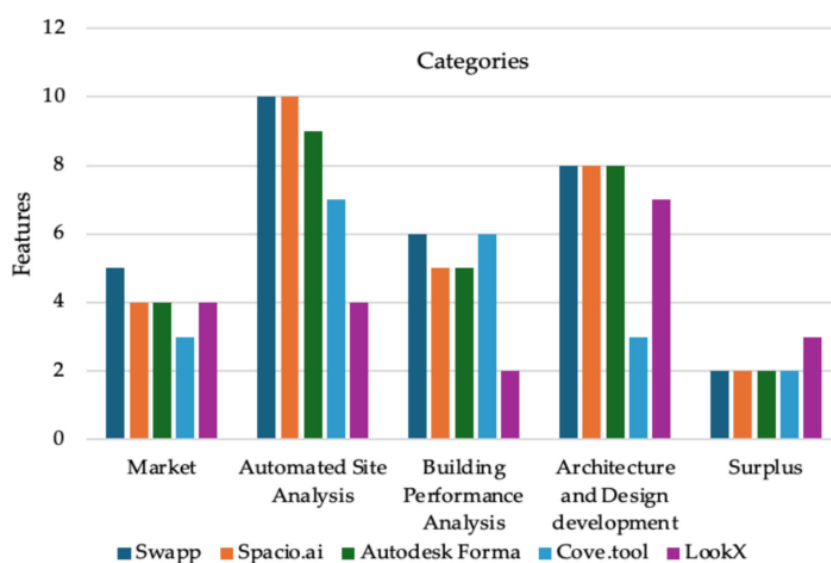


Figure 7 : Top 5 des logiciels IA par fonctionnalités ICBMC 2025

Ressource numérique :



proceedings of ICBMC
(Hwee, 2025)

6.2. **ANALYSE COMPARATIVE DES LOGICIELS D'OPTIMISATION**

Cette section propose une analyse comparative des principaux logiciels d'optimisation utilisés dans le cadre de la conception architecturale et de la performance des bâtiments. L'objectif n'est pas de présenter de manière exhaustive l'ensemble de leurs fonctionnalités, mais plutôt de mettre en évidence les éléments essentiels permettant de comprendre leur logique de fonctionnement ainsi que leur apport dans le processus d'optimisation. Cette approche vise à identifier les forces et les spécificités de chaque outil afin de mieux apprécier leur contribution aux différentes étapes de conception et d'aide à la décision.

Finch3d

Le logiciel Finch3D est une plateforme de conception architecturale assistée par intelligence artificielle, fondée en 2019 par Pamela Nunez Wallgren, Jesper Wallgren et Martin Kret. Il est destiné à intervenir principalement en amont du processus de conception, lors des phases d'esquisse et de développement initial des projets (Finch, s. d.). L'outil repose sur une logique de conception paramétrique ; où l'utilisateur y définit un ensemble de contraintes et d'objectifs, tels que la densité, la répartition des surfaces, l'organisation des circulations... À partir de ces paramètres, le logiciel génère et ajuste automatiquement différentes propositions de plans ou de volumes. Finch3D ne produit donc pas une solution unique, mais permet d'explorer un ensemble de variantes issues des données fournies par l'utilisateur. Le fonctionnement du logiciel s'appuie sur des algorithmes et des structures de graphes permettant d'analyser les relations spatiales entre les différentes entités du projet, tout en intégrant des mécanismes de vérification des règles afin d'identifier d'éventuelles incohérences et de contrôler le respect des contraintes définies. Cette approche facilite l'optimisation progressive des solutions proposées. En parallèle, Finch3D fournit des retours quantitatifs en temps réel, notamment sous forme de surfaces, de

performances ou de distributions spatiales, ce qui permet la comparaison de plusieurs alternatives de conception (Finch, s. d.). L'agent intégré « Archie », permet d'automatiser certaines tâches précises, telles que le positionnement d'éléments architecturaux ou la mise à jour de relations spatiales entre unités. Finch3D peut être utilisé en complément d'autres environnements de conception tels que Rhino, Revit, Grasshopper, Forma ou Archicad, dans une logique d'interopérabilité. Ainsi, Finch3D s'inscrit comme un outil d'aide à l'exploration et à l'évaluation de scénarios de conception, permettant de tester et comparer rapidement différentes configurations dès les premières étapes du projet (NU Design Spaces | Discover, s. d.).

Spacio.ai

Spacio est un outil de conception architecturale et urbaine fonctionnant dans un environnement web et s'appuyant sur des approches d'intelligence artificielle générative. Il permet de produire des simulations en temps réel de la volumétrie urbaine et de son environnement, tout en offrant un espace de modélisation interactif directement accessible (Spacio, s. d.). Le logiciel génère automatiquement une configuration initiale du site à partir de données cartographiques, incluant le terrain, le contexte et les bâtiments existants. L'utilisateur peut ensuite esquisser des volumes, auxquels le système associe immédiatement des analyses et des indicateurs de performance. Ces retours portent notamment sur les surfaces, l'ensoleillement, la lumière naturelle, le bruit ou encore la gestion des eaux pluviales. Les simulations sont mises à jour en continu et peuvent être exécutées en parallèle afin de tester différentes variantes de conception. Spacio intègre également des fonctionnalités de génération automatisée de plans d'étage et d'assemblage d'unités, permettant d'explorer différentes configurations de logements. Il propose en parallèle des vérifications en temps réel des contraintes réglementaires, notamment les hauteurs, les reculs, la sécurité incendie et le stationnement. Des indicateurs de performance du projet, comme la surface brute/nette ou l'efficacité globale, sont également calculés et actualisés en continu. Le logiciel produit enfin des résultats structurés compatibles avec les flux de travail BIM, notamment sous forme de fichiers IFC. L'ensemble du processus se déroule sans installation locale, dans un environnement entièrement basé sur le navigateur (AEC Magazine Spotlight Directory, 2025).

Hypar

Hypar est une plateforme de conception et de modélisation orientée vers une approche dite de « BIM 2.0 », reposant sur des principes de conception générative basés sur des règles. Elle permet de produire des modèles BIM à partir de logiques de construction programmées ou d'instructions formulées en langage naturel, en exécutant un ensemble de règles définissant le comportement des éléments du projet. À partir de ces paramètres, la plateforme génère automatiquement des modèles cohérents et dynamiques, pouvant être mis à jour en fonction de l'évolution des données

d'entrée. Cette approche vise à structurer la conception autour de processus paramétriques et automatisés, afin de réduire les tâches répétitives et d'améliorer l'efficacité des phases de conception (AEC Magazine Spotlight Directory, 2025). Hypar permet également l'extraction et l'exportation de données quantitatives liées au projet, notamment sous forme de métriques structurées pouvant être analysées dans des tableurs tels qu'Excel (Hypar, s. d.). Ces fonctionnalités facilitent l'évaluation des performances et la comparaison de différentes variantes de conception au cours du processus.

Maket.ai

Maket AI est un outil de conception générative qui transforme des contraintes programmatiques en plans d'étage 2D. L'utilisateur y introduit un ensemble de paramètres tels que la surface totale, le nombre de pièces, les typologies d'espaces ou d'autres exigences supplémentaires, à partir desquels le logiciel génère automatiquement des propositions de plans résidentiels (Maket, s. d.). L'algorithme produit ensuite plusieurs variantes organisées selon des logiques d'optimisation spatiale. Ces propositions sont modifiables en temps réel par l'utilisateur et recalculées instantanément, ce qui permet un processus d'itération rapide et continu. L'outil est principalement orienté vers la conception résidentielle et les phases d'esquisse (Maket, s. d.).

Plan Finder

PlanFinder est un logiciel de conception générative utilisé en phase préliminaire du projet architectural. Il repose sur la définition géométrique du site (périmètre, limites, façades, points d'accès) associée à un ensemble de contraintes programmatiques définies par l'utilisateur, telles que les surfaces par fonction, le nombre de pièces, les relations de proximité ou encore l'organisation des circulations. Ces données sont traduites par le logiciel en un modèle géométrique et relationnel interne, permettant la génération automatique de plusieurs variantes de plans d'étage (AEC Magazine, s. d.). Chaque configuration est recalculée en temps réel lors de la modification des paramètres, ce qui permet une exploration itérative rapide. PlanFinder s'intègre en complément d'environnements de modélisation tels que Rhino et Revit. (PlanFinder, s. d.).

Autodesk Forma Site Design

Autodesk Forma Site Design (anciennement Autodesk Forma avant novembre 2025) est une plateforme BIM cloud destinée à la conception de projets urbains et architecturaux en phase amont (Forma Site Design, s. d.). Elle repose sur un environnement collaboratif permettant à différents acteurs du projet : architectes, urbanistes et ingénieurs, d'intervenir dès les premières

étapes de conception (Badawi et al., 2025). La plateforme permet l'importation et l'organisation de données liées au site, notamment des données spatiales, environnementales et urbaines, afin de les intégrer dans un environnement de travail. Ces données servent ensuite de base à la génération et à l'exploration de différents scénarios de conception, permettant de tester des variantes de formes urbaines et d'étudier leurs implications dans un cadre numérique. L'intégration des technologies BIM et SIG facilite la mise en relation et le traitement conjoint de ces informations au sein de la plateforme. Autodesk Forma Site Design s'intègre également à différents outils de conception et de production : Revit, Dynamo, Rhino, ainsi que l'Autodesk Construction Cloud (Forma Site Design, s. d.). Cette interopérabilité permet une continuité des données entre les différentes phases du projet. Son utilisation s'inscrit dans un environnement de travail fortement basé sur les données, ce qui nécessite une structuration adaptée des informations et une attention particulière à leur organisation afin d'assurer une exploitation cohérente au sein des différents projets.

Autodesk Forma Building Design

Autodesk Forma Building Design, actuellement annoncé en version à venir avec possibilité d'inscription à une liste d'attente pour la phase bêta, prolonge les fonctionnalités d'Autodesk Forma Site Design vers les phases de conception de masse et de conception architecturale des bâtiments. Il permet de transformer les analyses de site en propositions volumétriques plus détaillées, en intégrant des paramètres liés à la morphologie du bâtiment, à la distribution des fonctions intérieures, ainsi qu'à la performance énergétique et à l'impact environnemental (Autodesk Forma Building Design, s. d.). Le logiciel génère plusieurs alternatives de conception à partir de ces paramètres et permet leur ajustement en temps réel dans un environnement de travail continu. Il fournit également des retours sur différents aspects de performance, tels que l'énergie, les émissions de carbone ou le confort, afin d'accompagner le développement progressif des solutions. Forma Building Design s'inscrit dans une logique de continuité entre les phases d'esquisse, de faisabilité et de développement préliminaire, en reliant ces étapes au sein d'un flux de conception assisté par les données.

ARCHITECTURES

Architectures est une plateforme de génération architecturale basée sur l'IA, permettant de produire des plans et des propositions de conception à partir de contraintes définies par l'utilisateur. L'outil génère plusieurs scénarios de projet en intégrant différents paramètres, tels que les surfaces nettes minimales et maximales par pièce et par typologie, les hauteurs, ainsi que les exigences liées aux circulations verticales, afin d'assurer la cohérence des propositions

(Architectures, s. d.). Le fonctionnement repose sur une approche itérative : les contraintes peuvent être ajustées en continu, ce qui entraîne la génération immédiate de nouvelles solutions. Le logiciel est principalement utilisé en phase conceptuelle afin de faciliter l'exploration rapide de différentes alternatives de conception. Il produit en temps réel un modèle BIM correspondant à la géométrie issue du processus de génération assistée par IA. La plateforme assure un suivi continu du projet en affichant des données actualisées telles que le programme des unités, les surfaces brutes par usage et par type, la répartition entre surfaces brutes et nettes, ainsi que la conformité des solutions aux paramètres définis. Elle intègre également un suivi détaillé des unités de travail, permettant d'associer des coûts unitaires à chaque élément et d'évaluer en temps réel l'impact économique des décisions de conception. Les utilisateurs peuvent par ailleurs créer des préreglages personnalisés pour les critères de conception et les paramètres de coûts, permettant l'adaptation de l'outil à différents besoins de projet. Certaines fonctionnalités sont à venir comme la simulation environnementale en temps réel des performances du bâtiment sur l'ensemble de l'année, permettant d'optimiser son organisation en fonction des objectifs de performance environnementale définis par l'utilisateur. Une fonctionnalité de conception collaborative multi-utilisateurs est également prévue, permettant l'intervention simultanée de plusieurs concepteurs sur un même projet (Architectures, s. d.).

Testfit

TestFit est un logiciel d'optimisation de faisabilité architecturale principalement utilisé dans le secteur immobilier. Il permet de générer en temps réel différents scénarios de développement en intégrant des contraintes économiques (rentabilité, coût au m²), urbanistiques (gabarits, densité, réglementations locales) et techniques (typologies, stationnement, circulations) (TestFit, s. d.). L'outil produit automatiquement des plans et des modèles volumétriques afin de représenter différentes options de projet. Ces propositions servent à explorer la faisabilité spatiale et économique des opérations dès les premières phases de développement, avant la conception détaillée. TestFit offre également des possibilités d'export vers des logiciels de conception : Revit, AutoCAD, SketchUp ou Excel ; permettant ainsi la poursuite du processus de travail dans d'autres environnements numériques (TestFit, s. d.).

La figure 9 présente un tableau récapitulatif des logiciels d'optimisation analysés précédemment. Celui-ci synthétise leurs principales caractéristiques générales, notamment leur année de lancement, leur pays de développement, leur lien d'accès, leur type de licence, leurs capacités d'importation et d'exportation de données, ainsi que les informations relatives à la protection des données, afin de mettre en évidence les conditions d'utilisation propres à chaque outil. Cette mise en perspective permet de faciliter la lecture comparative des différentes plateformes étudiées.

Logiciel d'optimisation	Année de lancement	Pays de développement	Lien URL	Licence	Importation	Exportation	Gestion des données et confidentialité
Finch3d 	2019	Suède	https://www.finch3d.com/	3 licences : gratuite limitée, basique (58.80euros/mois) et entreprise (1200euros/an)	Rhino	PNG, CSV, Grasshopper, Rhino, Revit, Archicad	Hébergement cloud des données utilisateurs et projets, conformité RGPD
Spacio.ai 	2022	Norvège	https://spacio.ai/	4 licences : gratuite limitée, démarreur (21 €/ mois), professionnelle (79 €/ mois) et entreprise (À partir de 3 995 €/an)	Image, DXF, obj, 3DM, Norkart	Capture d'écran, DXF, OBJ, 3DM, Excel, BIM, IFC, Revit, Archicad	Stockage cloud des données utilisateurs et projets, conservation partielle jusqu'à 5 ans
Hypar 	2018	Etats-Unis	https://hypar.io/	2 licences : gratuite limitée et 21.55 euros/mois	dRofus, LAZ, LAS, DXF, DWG, PNG, PDF, JPG, XLS, CSV, mobilier revit	Image, PDF, Revit, Rhino, métriques Excel	Stockage cloud des données de projet et conformité RGPD.

Maket.ai	2019	Canada (Montréal)	https://www.maket.ai/	3 licences : gratuite, pro 30 dollars par mois, illimitée à 300 dollars par mois	Pdf, image existante (fonctionnalités à venir)	DXF, PDF, JPEG	Conservation limitée des données utilisateurs et projets conformément au RGPD
							
Plan Finder	2019	Pays-Bas	https://www.planfinder.xyz/	30 jours gratuits avec accès complet, limités à 8 générations par projet et 8 projets. Abonnement : 16 €/mois, 24 générations par projet et projets illimités.	Extension pour logiciels de conception (BIM), saisie des données de projet	PDF, PNG, JPEG	Conservation limitée aux données nécessaires au fonctionnement, à la sécurité, aux licences et aux paiements ; données de génération temporaires et non stockées, conformément au RGPD
							
Forma Site Design	Mai 2023	États-Unis	https://www.autodesk.com/be-fr/products/forma/overview	Licence étudiante gratuite. Abonnement Forma Site Design : 206 €/mois, 1.664 €/an ou 4.986 € pour 3 ans.	DWG, DXF, OBJ, SKP, FBX, STL,	DWG, DXF, OBJ, SKP, FBX, STL, Revit, Rhino, Dynamo, Autodesk Construction Cloud	Hébergement cloud Autodesk avec gestion des données conforme au RGPD
							

Architectures	2023	États-Unis	https://architectures.com/en	Essai gratuit de 7 jours. Licence Pro : 41 €/mois (492 €/an). Licence Entreprise : 246 €/mois (2.952 €/an)	OBJ/GLTF/FBX	OBJ/GLTF/FBX	Données de projet hébergées sur cloud et conservées le temps nécessaire au service
Testfit	Octobre 2017	États-Unis	https://www.testfit.io/	Urbaniste : 100 \$/mois Cartes de données : 400 \$/mois Site Solver : à partir de 10 000 \$/an Entreprise : sur devis (service commercial)	via add-ins en PDF, DXF (CAD), important des fichiers TestFit exportés (.tfrvt)	SKP (SketchUp), CSV, GLTF, format .tfrvt pour Revit	Hébergement des données projets et utilisateurs avec protections conformes aux réglementations européennes

Figure 9 : tableau comparatif des logiciels IA (réalisation personnelle)

6.3. RETOUR D'EXPERIENCE DE BUREAUX D'ARCHITECTURE

Si la documentation scientifique et professionnelle traite souvent de l'optimisation paramétrique (Grasshopper, Ladybug Tools, Revit, Dynamo, ...), peu d'études décrivent concrètement la manière dont les architectes intègrent aujourd'hui des outils d'IA génératifs dans leurs pratiques quotidiennes. Or, ces outils encore récents promettent de faciliter les choix de conception en automatisant la génération de variantes selon différents critères. Cependant, aucune source publique ni publication académique ne détaille comment ces promesses se traduisent dans le cadre de projets réels. C'est pour combler cette lacune que ce travail adopte une démarche empirique fondée sur l'interview de bureaux d'architecture utilisateurs de ces outils.

L'objectif des entretiens est de comprendre les motivations et les modalités d'intégration des logiciels d'optimisation basés sur l'intelligence artificielle dans les processus de conception architecturale. Il s'agit également d'identifier les critères d'optimisation effectivement mobilisés par les architectes, tels que le confort lumineux, le confort thermique, la fluidité des circulations, la compacité ou encore la qualité spatiale. Les entretiens visent en outre à évaluer les impacts concrets de ces outils sur la pratique du projet à petite échelle, notamment en termes de gain de temps, d'amélioration de la qualité des propositions, de capacité d'itération et de communication avec le client. Enfin, ils permettent de mettre en évidence les limites, freins et résistances liés à l'adoption de ces technologies au sein des agences d'architecture.

Les bureaux ciblés pour l'enquête sont les suivants : ces bureaux ont été identifiés grâce à la présence visible de l'utilisation des logiciels concernés sur leurs sites internet.

Logiciel concerné	Bureau d'architecture	Pays
Spacio.ai	Oslo Works	Norvège
Spacio.ai	Franz & Sue	Autriche
Spacio.ai	Urban Works	Suède
Finch3D	Gehl	Danemark
Finch3D	Schmidt Hammer Lassen Architectes	Danemark
Finch3D	DGM & Associés	France

Parmi ces 6 bureaux contactés, le bureau DGM& Associés nous a consacré du temps pour échanger sur leur utilisation du logiciel Finch3D (annexe 2).

Les architectes ont été contactés par courriel en présentant le cadre académique du mémoire ainsi que les objectifs de la démarche d'entretien. Le message précisait qu'il s'agissait d'un entretien semi-directif, basé sur une grille de questions ouvertes permettant de laisser une certaine liberté dans les réponses tout en assurant une structure aux échanges. Le format proposé était flexible, avec la possibilité de réaliser l'entretien en visioconférence ou par échange écrit, en fonction des disponibilités des participants. Enfin, il était indiqué que les entretiens pouvaient être menés en français ou en anglais, selon les préférences et le contexte du bureau d'architecture concerné.

En complément de l'entretien réalisé auprès de DGM & Associés afin de comprendre comment sont intégrés des logiciels d'optimisation et d'intelligence artificielle dans ses processus de conception, un entretien a également été mené auprès du bureau UMAN à Liège afin de comprendre les usages existants ou envisagés de l'intelligence artificielle dans le processus de conception architecturale.

Au sein de DGM & Associés, l'adoption de Finch3D s'est faite dans une logique d'exploration des outils d'IA afin d'optimiser à certaines étapes du processus de conception, notamment en phase de faisabilité. L'outil est principalement utilisé pour générer des variantes de distribution spatiale et de typologies, sans intervenir directement dans les arbitrages liés aux critères environnementaux ou contextuels. L'IA est ainsi perçue comme un outil d'accélération du travail de conception, permettant de produire rapidement plusieurs alternatives, sans toutefois se substituer à la prise de décision architecturale, qui reste entièrement assurée par les concepteurs (Entretien avec Bronchart et Pak, DGM & Associés, 2025, annexe 2). L'intégration de Finch3D dans le flux de travail architectural reste par ailleurs dépendante des logiciels BIM existants, ce qui nécessite des compatibilités avec les outils déjà utilisés au sein du processus de conception.

Dans le bureau UMAN, l'intégration de l'intelligence artificielle repose sur la mise en place d'un laboratoire interne dédié à l'expérimentation de différents outils. Celui-ci regroupe plusieurs collaborateurs et explore plusieurs axes d'application, notamment la génération d'images, l'analyse documentaire et l'assistance à la production graphique. Les outils utilisés incluent notamment ChatGPT, Copilot et NotebookLM pour l'analyse et la rédaction des cahiers des charges, ainsi que des outils de génération visuelle tels que Gemini Pro, utilisés pour tester rapidement des intentions graphiques (Entretien réalisé auprès du bureau UMAN, 2026, annexe 1). Cette organisation témoigne d'une intégration transversale de l'IA dans les différentes phases du projet, tout en maintenant une distinction claire entre outils d'exploration et production architecturale finale.

Les deux agences convergent sur un point essentiel : l'IA est avant tout utilisée comme un outil d'accélération et d'exploration, et non comme un système autonome de conception. Elle permet notamment de générer rapidement des variantes, de tester des hypothèses ou encore d'analyser des

documents, mais elle ne remplace pas le rôle de l'architecte dans les arbitrages complexes qui restent difficilement intégrables dans les logiques actuelles des outils d'IA.

Les limites identifiées confirment la position intermédiaire qu'occupe actuellement l'intelligence artificielle dans le processus de conception architecturale. Que ce soit dans l'utilisation de Finch3D ou dans les expérimentations menées au sein du bureau UMAN, l'IA reste principalement mobilisée en phase amont du projet, pour la génération de volumes, l'exploration de variantes ou encore la production de supports visuels et analytiques. Toutefois, plusieurs limites persistent, notamment la prise en compte encore partielle des critères environnementaux, la nécessité d'assurer des compatibilités avec les logiciels BIM existants, ainsi que la fiabilité variable des résultats générés, certains outils produisant parfois des incohérences ou des erreurs, en particulier lors de la génération de plans ou d'images. L'intelligence artificielle apparaît ainsi davantage comme un outil d'assistance et d'exploration que comme un outil de conception finale, nécessitant un contrôle et une validation systématiques de la part des concepteurs.

Ces entretiens mettent en évidence une intégration déjà amorcée de l'IA dans les pratiques architecturales, qui dépasse aujourd'hui une simple phase d'expérimentation ponctuelle pour s'inscrire progressivement dans certains flux de travail de conception. Toutefois, cette intégration reste encore partielle, tant dans les usages que dans les niveaux d'accès et de maîtrise des outils, et s'accompagne d'un maintien du rôle central de l'architecte dans les arbitrages et la validation des résultats (Entretien réalisé auprès du bureau UMAN, 2026, annexe 1 ; Entretien avec Bronchart et Pak, DGM & Associés, 2025, annexe 2). Dans ce contexte, l'enjeu ne réside plus uniquement dans la découverte des outils, mais dans leur sélection, leur articulation et leur intégration pertinente au sein des différentes phases du projet architectural.

6.4. **SELECTION DES LOGICIELS POUR LA PHASE EXPERIMENTALE**

Autodesk Forma Site Design constitue un outil pertinent pour l'analyse de la lumière naturelle en phase amont. Il propose des analyses en temps réel de l'ensoleillement, du potentiel de lumière du jour, des ombres et de l'orientation, à l'aide d'indicateurs clairs et visuels. Conçu spécifiquement pour les phases de conception préliminaires, Forma travaille toutefois principalement sur des volumes et non sur des plans détaillés, ce qui le rend peu précis à l'échelle de l'aménagement intérieur. Il est donc à utiliser comme outil conceptuel, et non comme outil principal pour la conception d'un plan.

Enfin, Spacio.ai constitue un outil intéressant. Il se concentre sur l'analyse et l'optimisation des espaces intérieurs, notamment en termes de circulation et de surfaces. Bien qu'il ne propose pas de calcul direct de la lumière naturelle, il contribue à améliorer la qualité spatiale, ce qui influence indirectement l'accès

à l'éclairage naturel. Son utilisation est pertinente dans une approche comparative ou exploratoire. Spacio.ai a été retenu comme second outil central de la démarche, en tant que plateforme de génération et d'évaluation de variantes morphologiques. Il permet de produire automatiquement différentes configurations de plans et de formes urbaines à partir de paramètres. Dans le cadre de cette recherche, son intérêt réside dans sa capacité à intégrer indirectement des logiques de performance environnementale, notamment en lien avec la lumière naturelle, à travers la comparaison de multiples scénarios morphologiques. Spacio constitue ainsi l'outil de transition entre l'analyse environnementale et l'évaluation multicritère des formes générées.

Les autres outils du marché présentent des apports complémentaires, sans toutefois s'inscrire directement dans la logique méthodologique retenue. Finch3D, par exemple, est pertinent dans une démarche d'optimisation volumétrique et de génération spatiale, mais ne propose pas d'analyse environnementale intégrée, notamment en ce qui concerne la lumière naturelle. Il reste principalement centré sur des critères de distribution spatiale et ne permet pas encore une optimisation avancée de paramètres tels que l'orientation solaire, l'exposition lumineuse ou les nuisances urbaines. Son utilisation suppose dès lors un couplage avec des outils spécialisés d'analyse environnementale. Dans ce contexte, les arbitrages liés à l'orientation, au confort et aux contraintes extérieures demeurent encore majoritairement du ressort de l'architecte (Bronchart & Pak, 2025, Annexe 2). Plan Finder, quant à lui, se concentre principalement sur la génération automatisée de plans d'appartements à partir de contraintes programmatiques. Bien qu'il favorise indirectement une meilleure organisation des espaces en façade, il n'intègre pas de calculs environnementaux explicites. Des approches plus avancées de simulation environnementale, notamment développées dans des outils tels que Solene, permettent une modélisation fine des phénomènes lumineux et thermiques (Mahaya, 2014), mais n'ont pas été retenues dans le cadre de ce travail, afin de préserver l'accessibilité de l'outil méthodologique proposé.

Enfin, il convient de mentionner Autodesk Forma Building, actuellement en développement, qui s'annonce particulièrement prometteur. Cette évolution de la plateforme vise à renforcer l'intégration entre analyse environnementale et conception architecturale, en permettant une continuité plus directe entre la génération de formes et l'évaluation de leurs performances. Bien qu'il ne soit pas encore disponible, cet outil confirme la tendance actuelle vers des environnements de conception intégrés, où analyse, génération et optimisation coexistent au sein d'un même flux de travail.

Ainsi, le choix méthodologique retenu dans ce travail repose sur une articulation cohérente entre Autodesk Forma pour l'analyse environnementale et Spacio.ai pour la génération et l'évaluation des variantes, dans une logique de conception assistée par données et par intelligence artificielle, centrée sur la performance de la lumière naturelle.

7. PHASE EXPERIMENTALE

7.1. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

Afin de mettre en application les recherches et les réflexions développées dans la partie théorique de ce travail, nous avons mené une étude de cas sur le site du projet étudié en atelier de Master 2 Q4, consacré à la thématique « habitat / habiter », que nous développons parallèlement à la rédaction de ce travail de fin d'études. Ce choix répond à la volonté d'expérimenter concrètement les outils étudiés au sein d'un processus réel de conception architecturale. Le site de projet se situe à Rocourt (fig.10), section de la ville de Liège, et se caractérise par un contexte particulièrement riche et hétérogène. Il comprend notamment un terrain accueillant chaque année, durant quelques jours, le festival des Ardentes, le site de l'ancienne caserne militaire Leman, la cité-jardin Lonay, le terril de Sainte-Barbe et Tonne, le parc des Coteaux, ainsi qu'un tissu résidentiel dense. Nous nous consacrerons plus spécifiquement au site de l'ancienne caserne militaire Leman. Aujourd'hui, celle-ci accueille une diversité de fonctions : des espaces de stockage appartenant à la Ville de Liège dont un recyparc ; un centre de la Croix-Rouge hébergeant environ 350 demandeurs d'asile ; les terrains et infrastructures du club de football du RFCL Liège ; une banque alimentaire ainsi que les archives de la Ville. Cette superposition de programmes confère au site une complexité d'usages et d'enjeux particulièrement pertinente au regard de la thématique de l'habiter. La forme urbaine est constituée d'un ensemble de bâtiments de différentes formes, tailles et gabarits.



Figure 10 : vue satellite de la zone de projet (Google Earth)

Dans ce contexte, l'objectif est de mettre en place un processus méthodologique structuré (fig.11), intégrant l'intelligence artificielle, afin d'optimiser la conception architecturale au regard du critère de la lumière naturelle. Cette méthode se développe en trois étapes principales. Il est important de préciser que cette démarche s'inscrit en parallèle d'un travail de conception mené en atelier. En amont de l'utilisation des outils d'intelligence artificielle, une analyse des besoins programmatiques ainsi qu'une définition des zones de projet sont réalisées dans le cadre de l'atelier de projet. Ces éléments permettent d'établir un cadre spatial et fonctionnel préalable à l'expérimentation.

Dans un premier temps, une analyse du site est réalisée au regard des critères environnementaux liés à la lumière naturelle sur Autodesk Forma Site Design. Cette phase permet d'objectiver les conditions existantes, notamment en termes d'orientation, d'ensoleillement, de masques bâtis et de potentiel lumineux.

Dans un second temps, nous générons une série de variantes de plans architecturaux à l'aide de Spacio AI. Cet outil intégrant l'intelligence artificielle offre la possibilité de produire rapidement une diversité de configurations spatiales intégrant dès leur conception les paramètres liés à la lumière naturelle, tout en s'inscrivant dans les zones de projet préalablement définies.

Enfin, une phase d'évaluation et de décision est mise en place. Les différentes variantes sont analysées à partir d'indicateurs mesurables relatifs à la lumière naturelle, permettant un classement objectif des solutions au regard de ces critères spécifiques. Cette étape vise à structurer la prise de décision en dépassant une approche uniquement intuitive.

L'intérêt de cette méthodologie réside dans sa capacité à articuler exploration créative et évaluation quantitative. Elle permet de multiplier les possibilités de conception, et surtout d'objectiver les choix architecturaux, en intégrant des critères environnementaux dès les premières phases du projet. Ainsi, ce processus méthodologique constitue un outil d'aide à la décision pour les architectes, favorisant une conception plus performante, plus informée et davantage attentive aux enjeux liés à la lumière naturelle.

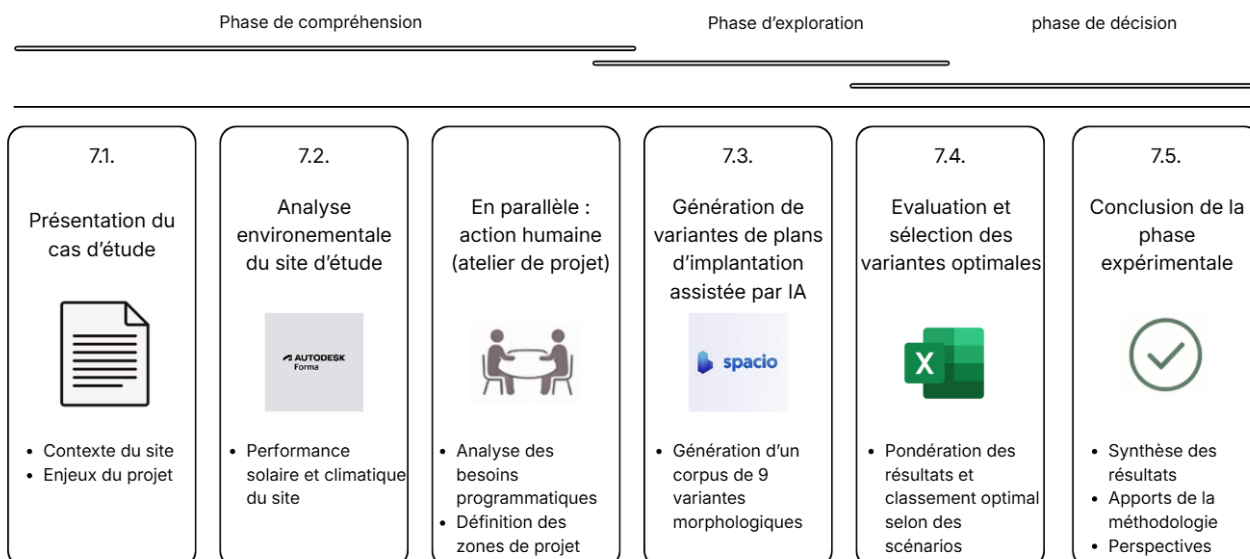


Figure 11 : schéma du processus méthodologique (réalisation personnelle)

7.2. ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU SITE D'ETUDE

L'analyse environnementale du site est réalisée à l'aide de l'interface en ligne Autodesk Forma Site Design. La démarche débute par le téléchargement de la modélisation du site (figure 12) via l'encodage de son adresse, permettant ainsi d'analyser un lieu situé n'importe où dans le monde. En quelques secondes la plateforme génère automatiquement le contexte environnant ainsi qu'un ensemble de données associées au territoire étudié. Cette modélisation initiale peut ensuite être enrichie par l'intégration de données complémentaires mises à disposition directement sur la plateforme. Ces informations s'ajoutent de manière instantanée au modèle numérique, permettant d'affiner progressivement la compréhension du site et de ses particularités. L'outil offre également la possibilité d'adapter ou de sélectionner différents modèles volumétriques afin de représenter au mieux la situation existante et son contexte bâti.

Ensuite, le périmètre d'étude est défini par le traçage des limites du site concerné. Cette étape permet de concentrer l'analyse sur la zone d'intervention tout en maintenant une prise en compte de son environnement immédiat, notamment en ce qui concerne les masques bâtis. L'analyse repose sur la mobilisation des fonctionnalités intégrées à la plateforme. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'analyse des **heures d'ensoleillement**, à l'évaluation du **potentiel de lumière naturelle**, à l'**étude des ombres** ainsi qu'à certains paramètres complémentaires tels que le **microclimat** ou le potentiel de **production d'énergie solaire**. Ces différentes simulations permettent de mettre en évidence les qualités et les limites du site en termes d'apport lumineux, constituant ainsi une base d'analyse pour orienter les choix de conception.

L'objectif de cette démarche est de mobiliser les données environnementales comme de véritables leviers de conception. Les résultats obtenus permettent d'identifier des zones présentant des qualités lumineuses contrastées, d'anticiper l'impact des ombres portées et d'orienter les choix d'implantation, d'orientation et d'organisation des espaces.

Ainsi, cette phase d'analyse constitue une base objective pour la suite du processus méthodologique. Elle alimente directement la génération des variantes de projet en définissant un ensemble de paramètres environnementaux à intégrer, tout en inscrivant la prise en compte de la lumière naturelle comme fil conducteur dès les premières phases de conception.



Figure 12 : modélisation du site de projet sur Autodesk Forma (réalisation personnelle, Autodesk Forma)

L'analyse des heures d'ensoleillement (fig. 13) permet d'obtenir une représentation à la fois visuelle et quantitative du nombre d'heures durant lesquelles les bâtiments et les espaces extérieurs reçoivent un ensoleillement direct à des dates données. Cette analyse est réalisée aux solstices et aux équinoxes. Le calcul repose sur une technologie de lancer de rayons (moteur OptiX™ de NVIDIA), où des rayons sont projetés depuis chaque point de mesure en direction du soleil afin de déterminer si ce point est à l'ombre ou ensoleillé à un instant donné (Bakkeli, s. d.)

Les résultats sont présentés sous forme de cartographies colorées accompagnées d'une échelle chromatique facilitant leur lecture. Chaque zone du site est associée à une valeur d'ensoleillement : les teintes claires, tirant vers le jaune, indiquent un fort taux d'exposition pouvant atteindre environ 9 à 10

heures par jour, tandis que les teintes plus sombres, tirant vers le bleu foncé, traduisent une absence quasi totale d'ensoleillement. Une lecture plus fine est possible grâce à l'outil « inspecter », permettant d'obtenir le nombre exact d'heures d'ensoleillement en un point précis, et offrant ainsi une complémentarité entre analyse globale et analyse localisée.

Les résultats doivent être interprétés avec prudence, dans la mesure où la catégorie « géométrie » ne permet pas de distinguer précisément les façades des toitures. Cette classification résulte des limites de reconnaissance des surfaces des bâtiments existants dans Autodesk Forma, qui repose sur une représentation simplifiée des enveloppes bâties. Les valeurs obtenues traduisent ainsi des tendances globales d'exposition, plutôt qu'une décomposition détaillée et exhaustive des différentes typologies de surfaces.

Les résultats de l'analyse des heures d'ensoleillement mettent en évidence une exposition globalement élevée du site durant une grande partie de l'année, avec des variations saisonnières marquées. Aux équinoxes de printemps et d'automne, la majorité des surfaces bénéficie d'un ensoleillement important, avec respectivement 68 % et 69 % du sol recevant plus de 9 heures d'ensoleillement, tandis que la géométrie bâtie présente des valeurs similaires (69 % dans les deux cas). Lors du solstice d'été, cette exposition atteint son maximum, avec 90 % des surfaces au sol dépassant 9 heures d'ensoleillement et 70 % pour la géométrie, traduisant des conditions très favorables. En revanche, le solstice d'hiver montre une diminution significative de l'exposition solaire, notamment au niveau du sol, où seulement 28 % des surfaces atteignent entre 6 et 7 heures d'ensoleillement. La géométrie conserve néanmoins des niveaux plus élevés, avec 59 % des surfaces comprises entre 7 et 8 heures, indiquant une meilleure captation du rayonnement solaire par les volumes bâtis que par les espaces extérieurs en période hivernale. Dans l'ensemble, ces résultats traduisent une forte exposition du site en périodes intermédiaires et estivales, contrastant avec une réduction notable en hiver, particulièrement marquée au niveau des espaces au sol.

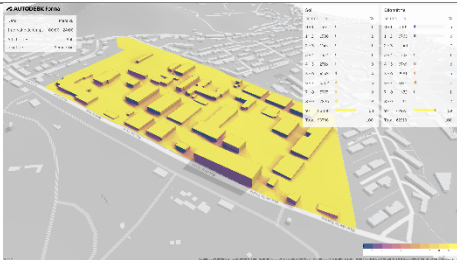
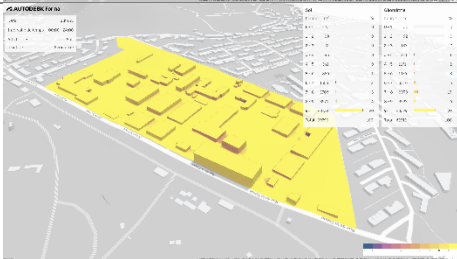
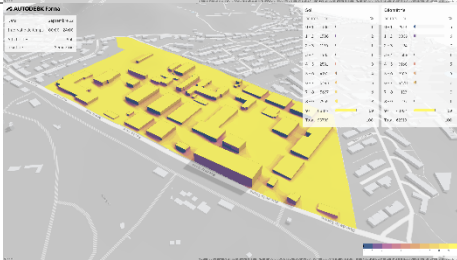
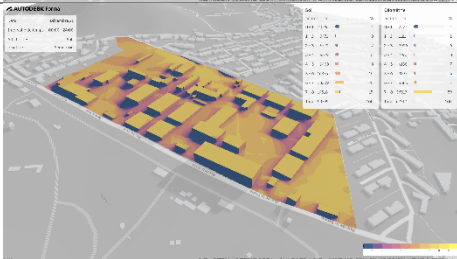
Date	Résultat graphique (cf annexe 3)	Sol (résultat dominant)	Géométrie (résultat dominant)
Équinoxe de printemps (20 mars 2026)		68% (9h+)	69% (9h+)
Solstice d'été (21 juin 2026)		90% (9h+)	70% (9h+)
Équinoxe d'automne (22 septembre 2026)		69% (9h+)	69% (9h+)
Solstice d'hiver (21 décembre 2026)		28% (6-7h)	59% (7-8h)

Figure 13 : Analyse des heures d'ensoleillement du cas d'étude (réalisation personnelle, Autodesk Forma)

L'**analyse du potentiel de lumière du jour** (fig. 15) permet d'obtenir une représentation visuelle et quantitative de l'accès des façades à la lumière naturelle. Elle repose sur le score de la Vertical Sky Component (VSC), qui correspond à la proportion de voûte céleste visible depuis une surface verticale. Plus ce score est élevé, plus la façade bénéficie d'un accès important à la lumière diffuse du ciel, tandis qu'un score faible traduit une forte obstruction du ciel par le bâti environnant et donc un potentiel d'éclairage naturel limité. Dans Autodesk Forma, ce score est exprimé en pourcentage et traduit directement la quantité de ciel visible, en intégrant les masques urbains générés par la morphologie du site.

La lecture des résultats s'effectue à travers une échelle chromatique allant des teintes bleu foncé correspondant à des valeurs de VSC faibles, indiquant un accès réduit à la lumière naturelle et des conditions d'éclairage limitées ; aux teintes bleu clair traduisent des valeurs élevées de VSC, donc un fort potentiel d'éclairage naturel et des conditions globalement favorables au confort lumineux. Forma Site Design utilise les seuils suggérés par le BRE (fig. 14) pour prédire les performances d'éclairage naturel. (Bakkeli, s. d.)

VSC	Conditions de lumière du jour
VSC ≥ 27%	La conception classique des fenêtres est généralement satisfaisante.
15 % < VSC < 27 %	Des fenêtres plus grandes ou des modifications de l'agencement sont généralement nécessaires.
5 % < VSC < 15 %	Difficile de fournir un éclairage naturel suffisant
VSC < 5%	Il est souvent impossible d'obtenir un éclairage naturel raisonnable.

Figure 14 : tableau des conditions de lumière du jour attendues pour différentes plages de scores VSC (Bakkeli, s.d.)

Les résultats de l'analyse du potentiel de lumière du jour mettent en évidence une situation très largement favorable à l'échelle du site. En effet, la grande majorité des surfaces, soit environ 85 % (53 293 m²), présente un score de VSC supérieur à 37%, ce qui dépasse largement le seuil de 27 % généralement considéré comme satisfaisant pour un éclairage naturel avec des fenêtres conventionnelles. Ces zones offrent donc des conditions très favorables à l'apport de lumière naturelle, sans nécessiter d'adaptations particulières en termes de conception des ouvertures.

Une part plus limitée des surfaces, soit 11 % (6 593 m²), se situe entre 32 et 37, ce qui reste également au-dessus du seuil de confort de 27 % et correspond à des conditions d'éclairage naturel satisfaisantes. Les classes de VSC inférieures à 27 % sont marginales sur le site, indiquant que très peu de zones nécessiteraient des ajustements tels qu'un agrandissement des baies ou une modification de la disposition des ouvertures. De même, les valeurs comprises entre 5 % et 15 %, associées à des situations où l'éclairage naturel devient difficile, voire insuffisant, sont quasiment inexistantes.

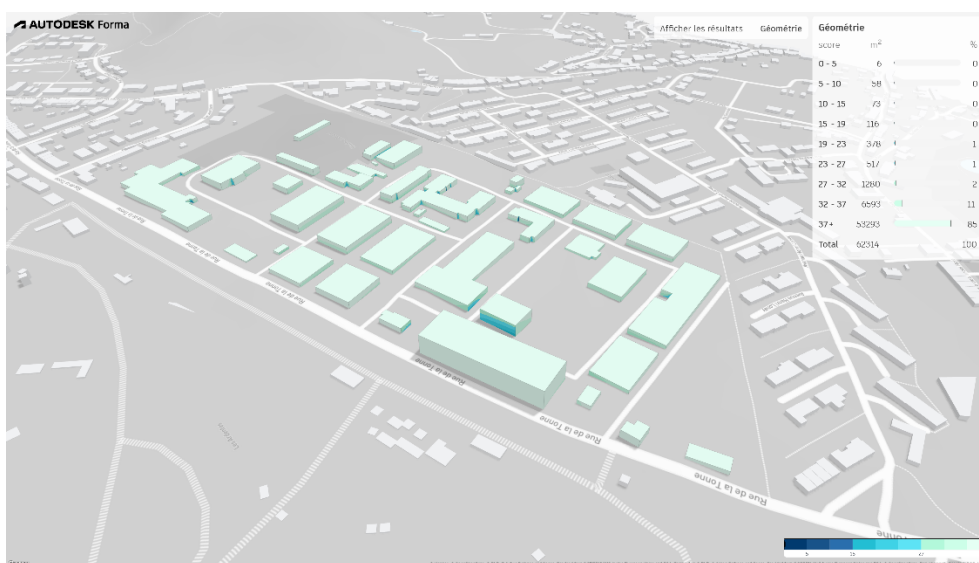


Figure 15: analyse du potentiel de lumière du jour (réalisation personnelle, Autodesk Forma)

L'**étude des ombres** (fig. 16) permet d'appréhender les conditions d'ensoleillement du territoire de Rocourt à travers l'analyse des zones ombragées et exposées. L'outil calcule la position du soleil et la projection des ombres de manière continue, heure par heure, en fonction de la localisation, de la date et de l'heure. Afin de faciliter la lecture, des heures clés (10h, 13h et 16h) sont retenues pour représenter des situations caractéristiques. Les simulations produites rendent ainsi lisible la direction, la longueur et l'emprise des ombres portées par le bâti et son environnement, offrant une compréhension fine de leur évolution au cours de la journée.

Les résultats mettent en évidence des variations saisonnières directement liées à la hauteur solaire. Lorsque le soleil est haut dans le ciel, les ombres sont plus courtes et l'exposition au soleil est plus importante, tandis qu'une faible hauteur solaire engendre des ombres longues et étendues, réduisant les surfaces ensoleillées, ce qui est largement démontré dans les études en physique solaire et en morphologie urbaine. Dans l'analyse, cela se traduit par des conditions relativement équilibrées lors des périodes intermédiaires, alors qu'en été les ombres sont limitées,

en particulier autour de midi. À l'inverse, en hiver, les ombres deviennent dominantes, notamment en début et en fin de journée, contraignant fortement l'accès au soleil.

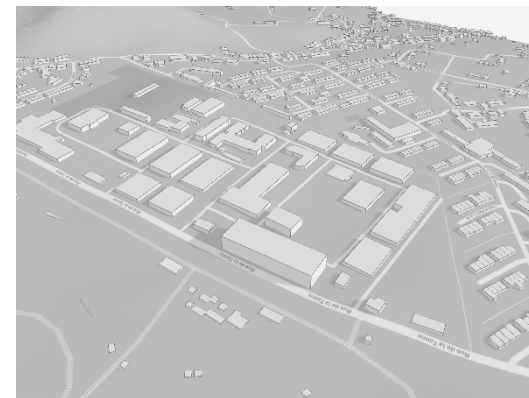
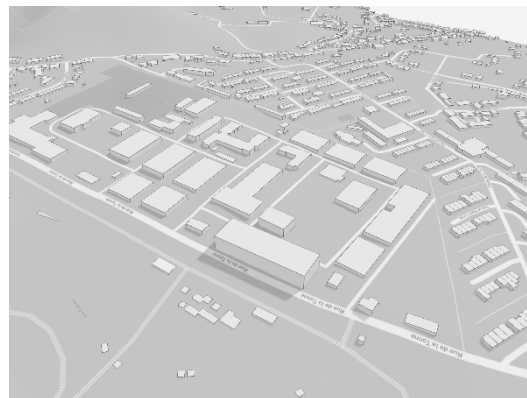
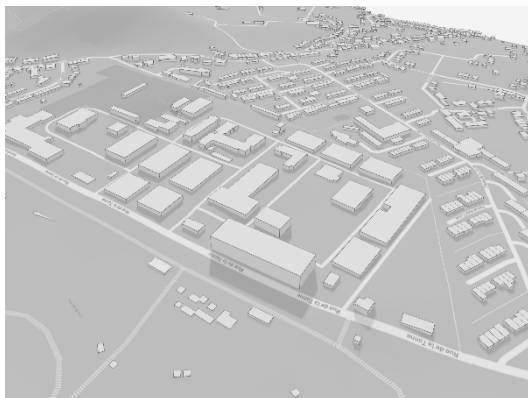
Par ailleurs, la morphologie du bâti joue un rôle déterminant dans la répartition des zones d'ombre et de lumière. La hauteur, la densité et l'implantation des constructions influencent directement les effets de masque et leur évolution au fil de la journée. L'observation des heures clés permet ainsi d'identifier les secteurs les plus sensibles, notamment en fin d'après-midi où l'allongement des ombres impacte davantage certaines zones du site. Ces éléments constituent un support d'aide à la décision pour orienter l'implantation des volumes et optimiser l'accès à la lumière naturelle.

10h

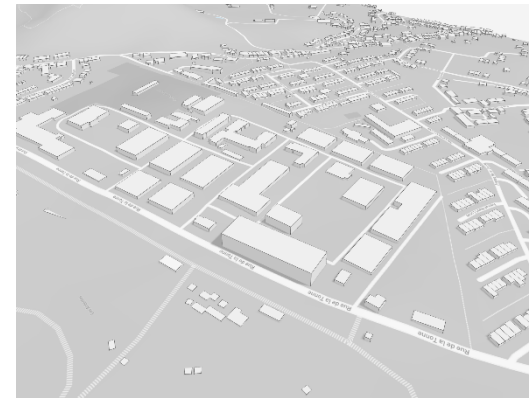
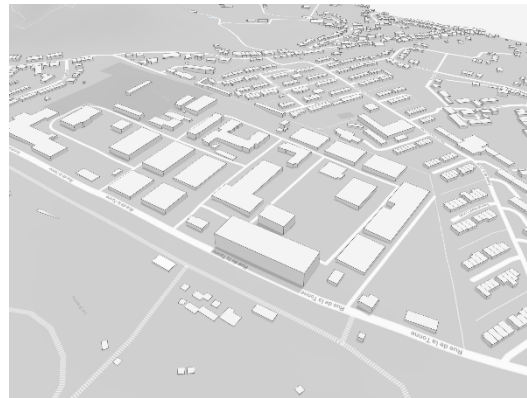
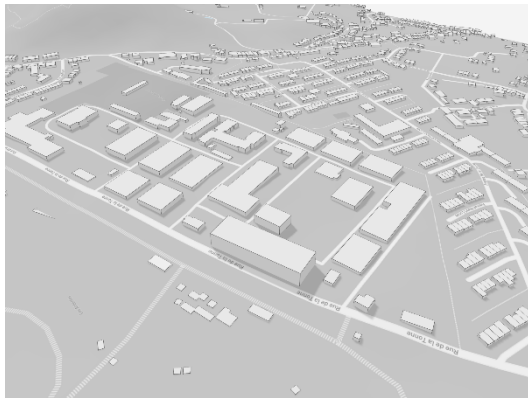
13h

16h

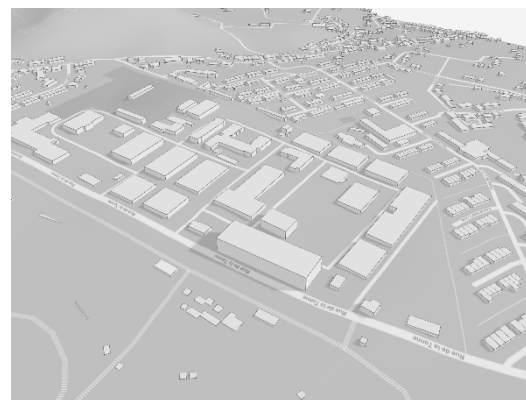
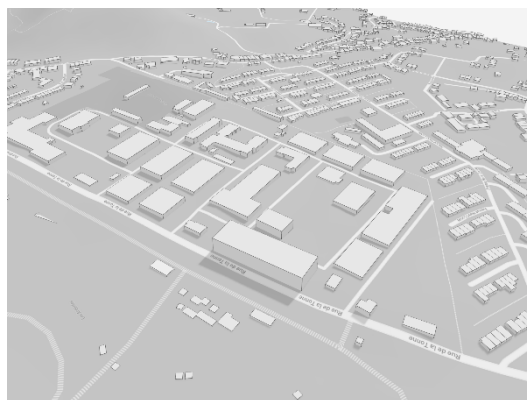
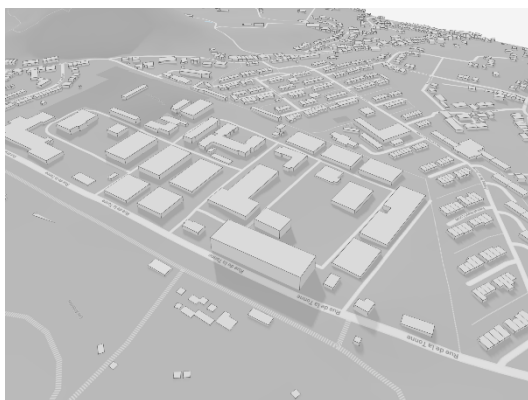
Équinoxe de printemps (20
mars 2026)



Solstice d'été (21 juin 2026)



Équinoxe d'automne (22
septembre 2026)



Solstice d'hiver (21 décembre
2026)

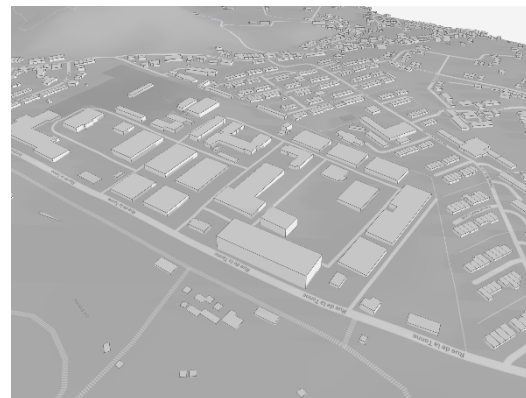
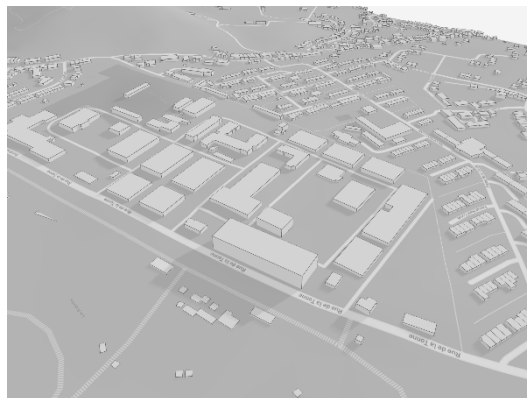
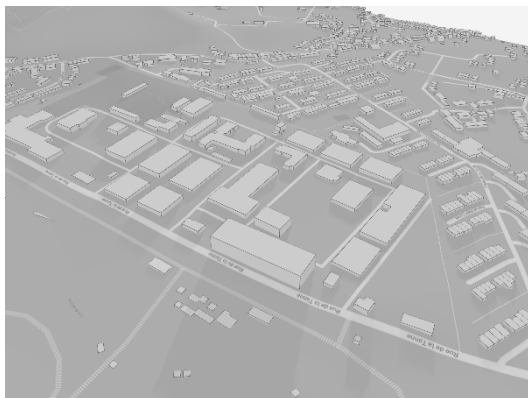


Figure 16 : tableau sur l'étude de l'ombre aux solstices et équinoxes du cas d'étude (réalisation personnelle, Autodesk Forma)

L'analyse du microclimat (fig. 17 et fig. 18) permet d'évaluer la température ressentie sur le site en croisant plusieurs paramètres environnementaux afin de dépasser la simple température de l'air. Elle repose sur la combinaison de données issues de l'ensoleillement, de la lumière du jour, du vent et des conditions météorologiques locales (température, humidité, rayonnement solaire direct et diffus). Ces facteurs sont intégrés dans un modèle de calcul de la température perçue, qui simule les échanges thermiques entre le corps humain et son environnement. Ainsi, une même température de l'air peut être ressentie différemment selon la vitesse du vent, l'humidité ou encore l'intensité du rayonnement solaire. L'outil permet également de tester différents scénarios climatiques, y compris des situations extrêmes, en s'appuyant sur des données statistiques locales et des variations saisonnières, ce qui rend possible l'identification de périodes critiques de confort ou d'inconfort (Bayle, s. d.).

L'interprétation des résultats met en évidence une forte variabilité saisonnière du confort thermique des sols, directement liée à l'intensité du rayonnement et aux conditions atmosphériques. En mars, le site reste majoritairement soumis à un stress thermique léger au froid (80 à 89 %), avec une amélioration ponctuelle du confort à la mi-journée (63 %), traduisant une montée en température encore limitée malgré un rayonnement modéré. En juin, les conditions apparaissent globalement favorables avec un confort dominant (90 à 100 %), mais l'apparition d'un stress modéré à la chaleur en début et fin d'après-midi (7 à 10 %) révèle une sensibilité du site à l'accumulation de chaleur radiative, notamment liée à l'intensité du rayonnement direct et diffus. Septembre constitue la situation la plus optimale, avec un confort thermique total sur l'ensemble de la journée, indiquant un équilibre entre apports solaires et conditions atmosphériques. À l'inverse, le mois de décembre se caractérise par un inconfort marqué, dominé par un stress modéré au froid (66 à 72 %) et un niveau de confort très faible, en raison d'un rayonnement solaire insuffisant pour compenser des températures basses et une forte couverture nuageuse.

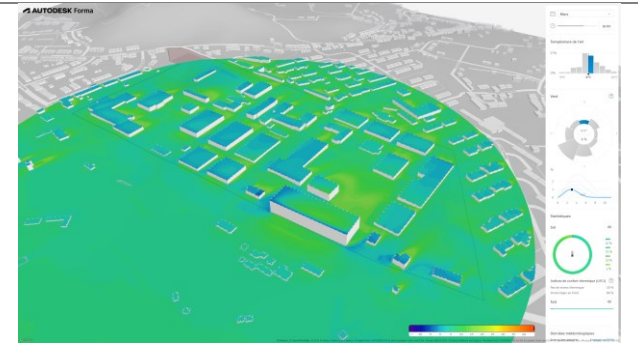
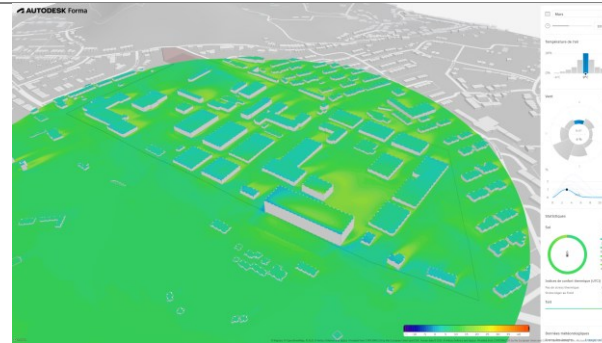
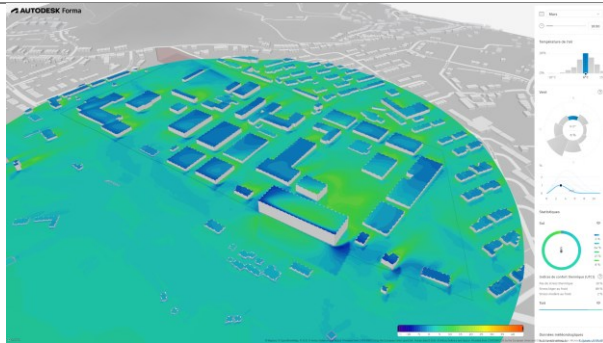
Ces résultats soulignent que le confort thermique du site dépend moins de la seule température de l'air que de la combinaison des flux radiatifs et des conditions atmosphériques. Ils mettent également en évidence une vulnérabilité au froid en hiver et en intersaison, ainsi qu'un risque ponctuel de surchauffe en été, ce qui souligne l'importance d'intégrer des dispositifs de protection solaire, de gestion des matériaux et de prise en compte de la morphologie urbaine dans la conception du projet.

10h

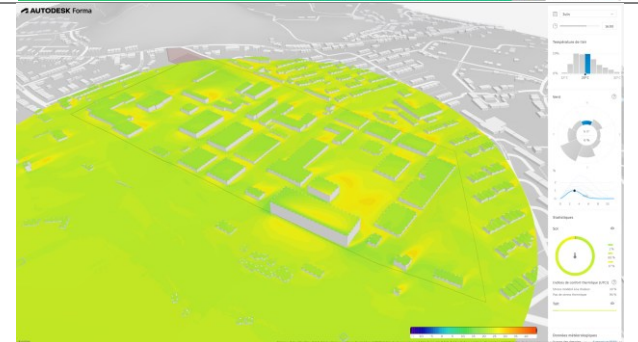
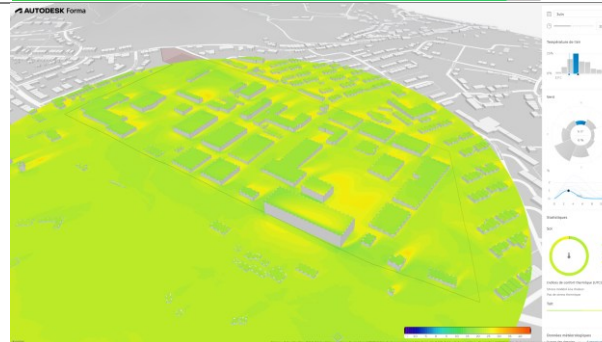
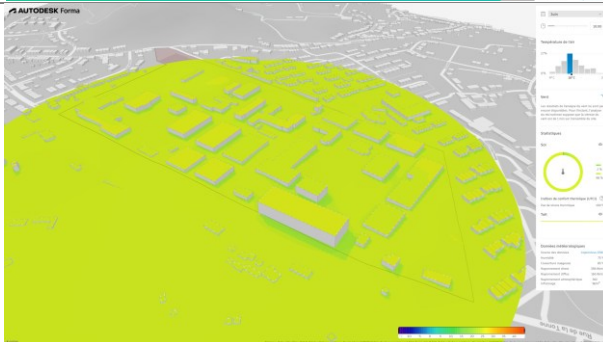
13h

16h

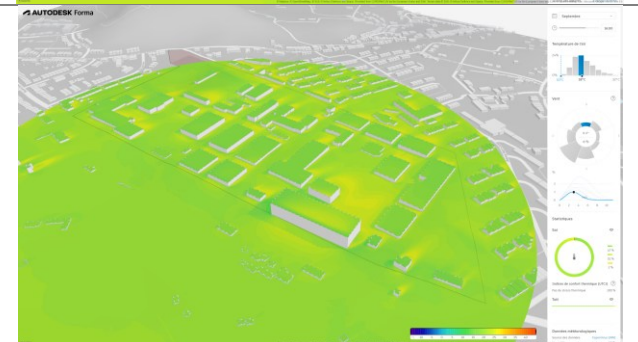
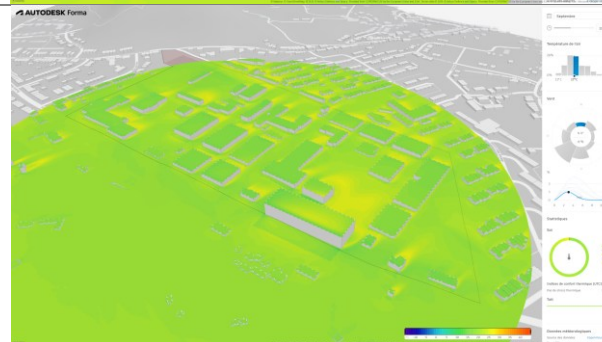
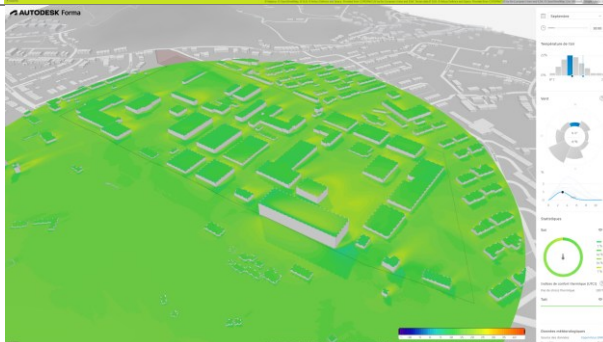
Mars



Juin



Septembre



Décembre

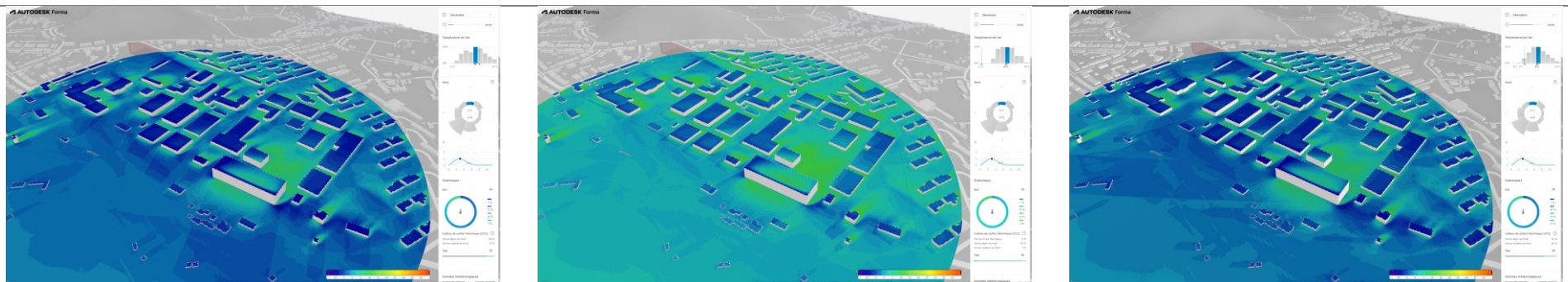


Figure 17: tableau sur l'étude du microclimat aux solstices et équinoxes du cas d'étude (réalisation personnelle, Autodesk Forma)

	Plage de Température de l'air (°C)	Couverture Nuageuse (%)	Rayonnement direct (W/m ²)	Rayonnement diffus (W/m ²)	Rayonnement atmosphérique infrarouge (W/m ²)	Stress Thermique des sols (UTCI)
Mars	-10°C à 21°C	88-90%	284-367	107-167	301-316	Stress léger au froid dominant (80–89%) ; confort max à 13h (63%)
Juin	9°C à 32°C	85-89%	350-376	166-243	362-382	Confort dominant (90–100%) ; stress chaleur modéré à 13– 16h (7–10%)
Septembre	8°C à 32°C	65-75%	342-429	100-160	344-369	Confort total (100%) toute la journée
Décembre	-4°C à 15°C	95-98%	88-167	18-75	303-308	Stress modéré au froid dominant (66–72%) ; très faible confort (≤6%)

Figure 18 : tableau récapitulatif des résultats de l'analyse du microclimat (réalisation personnelle, Autodesk Forma)

L'analyse de l'énergie solaire (fig.19) d'évaluer le potentiel de production d'énergie photovoltaïque d'un projet dès les premières phases de conception. Elle repose sur le calcul du rayonnement solaire reçu par les surfaces du modèle (toitures et façades), en intégrant la géométrie du projet, son orientation, le contexte environnant (bâtiments, relief, ombrages) ainsi que les données climatiques locales. Cette analyse quantifie l'énergie solaire annuelle incidente, exprimée en kWh/m², et permet d'identifier les surfaces les plus exposées au rayonnement afin d'estimer la production électrique potentielle de panneaux photovoltaïques. Les résultats sont visualisés sous forme de carte colorée, où les teintes les plus élevées correspondent aux zones recevant le plus de rayonnement solaire. L'utilisateur peut également paramétrer le taux de couverture des panneaux et leur rendement afin d'obtenir une estimation réaliste de la production énergétique annuelle. (Bakkeli, s. d.)

L'interprétation des résultats met en évidence une forte hétérogénéité du potentiel solaire à l'échelle du site. D'après la figure analysée, les toitures apparaissent majoritairement en teintes jaunes à orange, indiquant un potentiel solaire élevé et relativement homogène, ce qui confirme leur rôle privilégié pour l'implantation de panneaux photovoltaïques. Les surfaces les plus performantes correspondent aux toitures planes ou faiblement inclinées, peu affectées par les ombrages portés. À l'inverse, certaines zones présentent des valeurs légèrement inférieures, traduisant l'impact de l'orientation des bâtiments et des masques solaires générés par la morphologie urbaine environnante. Les données chiffrées associées indiquent un potentiel annuel total d'environ 41 400 000 kWh, dont 1 120 kWh/m² en moyenne, pour une surface analysée de près de 36 886 m², ce qui témoigne d'un gisement énergétique significatif à l'échelle du site. L'estimation de production électrique (environ 2 960 000 kWh/an avec 60 % de couverture et 15 % de rendement) souligne la capacité du projet à contribuer à une production d'énergie renouvelable locale.

Ces résultats confirment que la morphologie urbaine et l'orientation des bâtiments jouent un rôle déterminant dans la captation du rayonnement solaire. Ils mettent en évidence le potentiel important des toitures comme supports de production énergétique, tout en soulignant la nécessité d'optimiser l'implantation, la forme et la hauteur des volumes bâtis afin de limiter les effets d'ombrage. L'analyse constitue ainsi un outil d'aide à la décision essentiel pour intégrer des stratégies passives et actives dès la conception, en vue de renforcer la performance énergétique et de réduire l'empreinte carbone du projet.

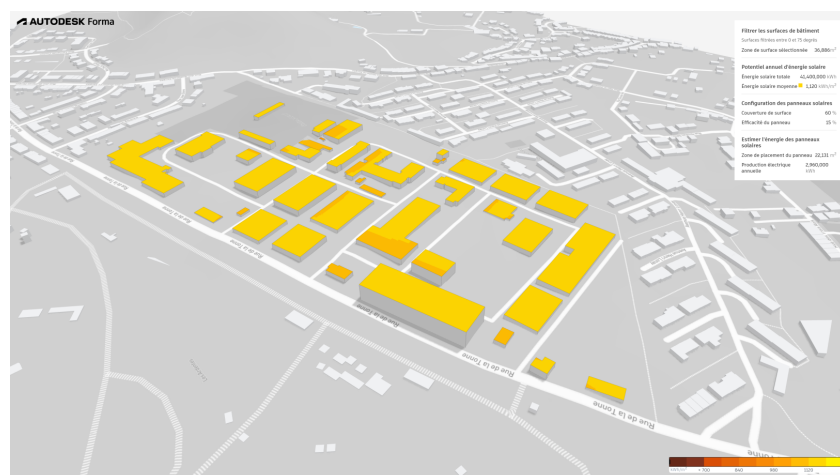


Figure 19: analyse de l'énergie solaire (réalisation personnelle, Autodesk Forma)

L'**analyse environnementale** met en évidence la manière dont la lumière naturelle structure le site, en permettant d'identifier les zones les plus exposées, celles soumises aux ombres, ainsi que les variations saisonnières du confort. Elle montre une disponibilité lumineuse globalement élevée sur une partie de l'année, particulièrement durant les périodes de mi-saison et estivales, traduisant un potentiel favorable à l'exploitation de la lumière naturelle dans la conception du projet. À l'inverse, la période hivernale révèle une diminution significative de l'ensoleillement au niveau du sol, liée à l'influence de la hauteur solaire et des masques bâtis. Ces résultats constituent des outils de conception en orientant les choix d'implantation, d'orientation des bâtiments et de répartition des usages, ainsi que la qualité d'éclairage intérieur, en fonction du potentiel lumineux du site.

Les conditions de lumière naturelle et de confort thermique ne dépendent pas uniquement des caractéristiques climatiques, mais de leur interaction avec la morphologie du site. Les analyses d'ensoleillement, d'ombres et de microclimat mettent en évidence que la hauteur, la densité et l'implantation des bâtiments modifient localement la distribution du rayonnement solaire. Ainsi, la forme urbaine n'est pas à l'origine des conditions climatiques, mais elle en conditionne l'expression à l'échelle du site (Oke, 2017). Dans cette logique, si les conditions climatiques s'imposent au projet, la conception architecturale permet d'améliorer l'accès à la lumière naturelle et les conditions de confort.

Il est important de relever que les résultats doivent être interprétés à l'échelle morphologique du site, les simulations reposant sur une représentation simplifiée des volumes, ce qui implique une lecture globale des tendances d'exposition lumineuse plutôt qu'une analyse détaillée du bâti. Cette approche permet d'identifier les principaux facteurs influençant la répartition de la lumière naturelle et d'envisager la configuration urbaine comme un levier d'amélioration des conditions d'ensoleillement sur le site. Dans cette perspective, Zhang et al. (2025) montrent, à partir de simulations urbaines, que la configuration

bâtie influence de manière quantifiable l'accès à la lumière naturelle et permet de définir des stratégies d'optimisation de l'exposition solaire en milieu urbain dense.

L'étude des ombres et du microclimat complète cette lecture en révélant l'interdépendance entre forme urbaine, ensoleillement et confort thermique. Les variations saisonnières traduisent des situations contrastées, marquées par une exposition importante en été et des contraintes accrues en hiver. Ces dynamiques confirment que la lumière naturelle doit être intégrée dans une approche globale du confort environnemental (Ostojić et al., 2026). Dans cette perspective, la littérature récente souligne l'intérêt d'intégrer les données environnementales dès les phases amont de la conception. Les indicateurs d'ensoleillement et d'accès à la lumière du jour permettent d'orienter les choix morphologiques et d'améliorer la performance globale des projets (Zhang et al., 2024). Par ailleurs, certaines recherches montrent que ces données peuvent être mobilisées dans des cadres de simulation urbaine intégrée afin d'évaluer l'impact de différentes configurations bâties sur les conditions d'exposition solaire et les performances environnementales (Alfouly et al., 2025). Ces approches relèvent d'une logique d'aide à la décision en conception, fondée sur l'analyse de scénarios morphologiques plutôt que sur une automatisation du processus de projet.

Ainsi, les résultats ne constituent pas uniquement un diagnostic, mais un ensemble structuré de paramètres de conception. Les gradients d'exposition lumineuse, les différences d'accès à la lumière du ciel et les contraintes microclimatiques définissent un cadre environnemental au sein duquel le projet peut se développer de manière informée.

Cette lecture environnementale constitue le socle de la phase suivante du travail. Les données issues de l'analyse sont mobilisées comme variables d'entrée dans un processus de génération de variantes via Spacio AI. La lumière naturelle y est intégrée comme un critère de conception à part entière, permettant d'orienter la production de formes architecturales en fonction de critères environnementaux explicites. Cette articulation entre analyse et génération marque le passage d'une lecture descriptive du site à une démarche de conception informée par les données, dans laquelle les performances lumineuses participent directement à la structuration du projet.

7.3. GÉNÉRATION DE VARIANTES DE PLANS D'IMPLANTATION ASSISTÉE PAR IA

En parallèle de l'analyse environnementale réalisée sur Forma, une action humaine a été menée dans le cadre de l'atelier de projet de master. Cette étape a consisté en une analyse des besoins et en la définition des zones d'intervention. À la suite de recherches, il a été identifié que, sur le site du RFCL Liège, la conservation des deux terrains de football existants n'était plus nécessaire, notamment au regard des projets du club prévoyant la création d'un nouveau terrain. Cette situation ouvre une

opportunité de requalification du site, notamment par l'introduction de logements. Le projet propose ainsi une mixité fonctionnelle avec des logements aux étages supérieurs et des commerces ou autres activités publiques au rez-de-chaussée. Dans ce travail, l'attention se porte sur une parcelle située sur l'un des terrains de football amenés à disparaître, afin d'y générer des plans de logements (fig.20).

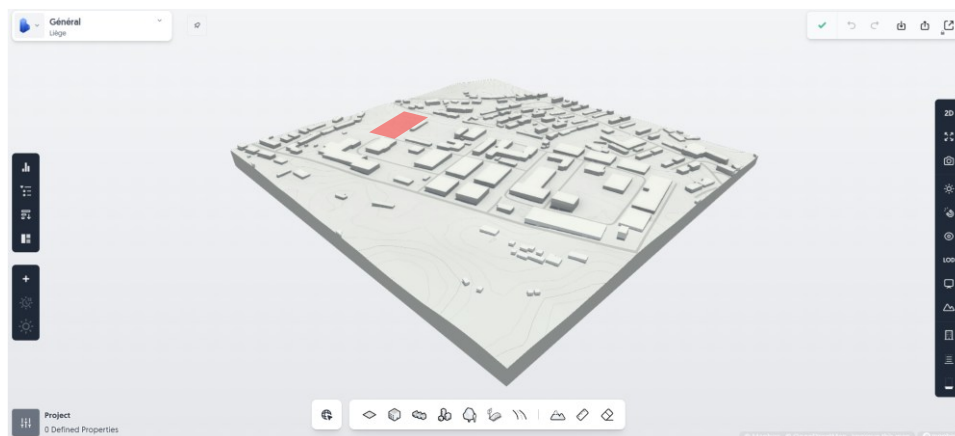


Figure 20 : Zone définie pour la génération de plans

Un corpus de neuf variantes a été généré à l'aide de Spacio.ai, afin d'explorer différentes logiques morphologiques. L'intérêt de cette approche repose sur l'exploration de différentes configurations urbaines, dans la mesure où la forme urbaine, à travers ses dimensions géométriques et son implantation dans le site, influence directement les apports solaires et le niveau d'éclairement (Mahaya, 2014). Les neuf variantes décrivent ainsi des stratégies urbaines distinctes, permettant d'évaluer indirectement la pertinence des paramètres morphologiques à travers leurs performances lumineuses.

La plateforme permet de générer des bâtiments en faisant varier différents paramètres d'entrée. Dans le cadre de cette étude, trois ont été retenues afin de produire des morphologies contrastées : la densité, l'utilisation du site et le degré d'ouverture. À partir de ces indicateurs plusieurs configurations ont été générées afin d'analyser leur influence sur les performances lumineuses et solaires une perspective d'optimisation des performances environnementales, basée sur la comparaison de plusieurs scénarios morphologiques.

Ces paramètres sont définis comme suit : la **densité** de construction (FSI ou FAR) correspond au rapport entre la surface de plancher brute totale d'un bâtiment et la superficie du terrain ; l'**utilisation du site** (GSI) exprime la proportion du terrain occupée par l'emprise bâtie ; enfin, l'**ouverture** (OSR) caractérise le niveau de porosité du tissu urbain, en lien avec les connexions entre espaces intérieurs, cour et rue. (Spacio, s. d.)

L'ensemble de ces indicateurs permet ainsi de mettre en relation les paramètres morphologiques (FSI, GSI, OSR) avec les performances lumineuses et énergétiques des configurations bâties, dans une

logique d'analyse comparative et d'optimisation des formes urbaines. Nous déterminons pour chaque variante (fig.21) les catégories « faible », « moyenne » et « élevée » attribuées aux variantes sont définies sur base des plages de variation des indicateurs disponibles dans Spacio.ai. Pour la densité (FSI, de 0 à 5.5), les seuils sont fixés à 0–1.5 pour une densité faible, 1.5–3.5 pour une densité moyenne et 3.5–5.5 pour une densité élevée. Pour l'utilisation du site (GSI, de 0 à 1), les valeurs sont réparties entre 0–0.3 (faible), 0.3–0.6 (moyenne) et 0.6–1 (élevée). Enfin, pour l'ouverture (OSR, de 0 à 1), les mêmes seuils sont appliqués, traduisant un gradient de porosité du tissu bâti.

VARIANTE	DESCRIPTION	DENSITE (FSI)	UTILISATION DU SITE (GSI)	OUVERTURE (OSR)
V1	Forme compacte minimale	Faible	Faible	Faible
V2	Forme ouverte minimale	Faible	Faible	Elevée
V3	Forme étalée	Faible	Elevée	Moyenne
V4	Forme compacte intermédiaire	Moyenne	Moyenne	Faible
V5	Forme neutre	Moyenne	Moyenne	Moyenne
V6	Forme ouverte intermédiaire	Moyenne	Moyenne	Elevée
V7	Forme dense compacte	Elevée	Elevée	Faible
V8	Forme dense fragmentée	Elevée	Moyenne	Moyenne
V9	Forme dense poreuse	Elevée	Moyenne	Elevée

Figure 21 : définition des variables d'entrée pour chaque variante

Suite à la génération des neuf variantes, la plateforme Spacio permet de réaliser un ensemble de simulations environnementales. Dans le cadre de cette étude, l'analyse se concentre sur trois indicateurs principaux : l'ensoleillement, le rayonnement solaire et le potentiel d'éclairage naturel, afin d'évaluer et de comparer les performances des différentes configurations. L'**analyse des heures d'ensoleillement** permet d'estimer la quantité de lumière directe reçue par les façades et les espaces extérieurs tels que terrasses, balcons, toitures ou terrains. Elle repose sur la définition précise de la date et de l'heure de simulation, avec une restitution des résultats sous forme de graphiques dans l'interface et de gradients appliqués en vue 3D. Cette approche permet de quantifier la durée d'exposition solaire, exprimée comme la part d'une surface recevant un nombre donné d'heures d'ensoleillement sur une période définie. L'évaluation est réalisée sur une année complète, complétée par des journées représentatives des

solstices et de l'équinoxe afin de représenter les variations saisonnières extrêmes et intermédiaires. Les réglementations européennes fixent généralement des seuils minimaux d'ensoleillement compris entre 1 et 4 heures pour garantir des conditions sanitaires satisfaisantes. Dans le cadre de cette étude, un seuil de 8 heures a été retenu comme indicateur plus exigeant, permettant d'identifier des situations d'ensoleillement élevé et d'assurer un niveau de confort lumineux accru pour les espaces (Ostojic et al., 2026). Le **rayonnement solaire** est estimé à partir de données météorologiques fournies par Open-Meteo.com, pouvant être analysées à différentes échelles temporelles (journée, semaine, saison ou année), ou issues d'une année météorologique typique, afin de prendre en compte les variations climatiques et saisonnières. Cette approche permet d'évaluer simultanément le confort extérieur, les gains thermiques potentiels à l'intérieur des bâtiments, les risques associés notamment en termes de surchauffe, ainsi que le potentiel de production d'énergie solaire en identifiant les emplacements les plus favorables à l'implantation de panneaux photovoltaïques. Le rayonnement est exprimé en kWh/m², ce qui permet une quantification homogène des apports énergétiques solaires sur les surfaces étudiées. Dans le cadre de cette étude, Spacio fournit à la fois des valeurs moyennes et des valeurs de pic. L'analyse présentée s'appuie principalement sur les valeurs moyennes, celles-ci permettant de caractériser un niveau d'exposition représentatif dans le temps et d'assurer une comparaison cohérente entre les différentes variantes, indépendamment des variations ponctuelles ou des conditions extrêmes (Spacio, s. d.). Le **potentiel d'éclairage naturel** correspond à la portion du dôme céleste visible depuis les façades, indicateur directement lié à la quantité de lumière naturelle pénétrant et disponible à l'intérieur des bâtiments. Cette mesure permet d'évaluer la capacité d'une configuration morphologique à capter et diffuser la lumière du jour en fonction de sa forme et de son implantation. Les résultats peuvent être visualisés selon différents modes d'analyse, mettant en évidence les zones bénéficiant d'un bon, moyen ou faible éclairage, et intégrant un système de lecture par filtres permettant de distinguer les performances globales. Les valeurs moyennes ou faibles signalent généralement un risque d'insuffisance lumineuse, notamment dans les espaces profonds ou peu exposés (Spacio, s. d.). Ces trois analyses ont été réalisées à l'échelle du bâtiment afin d'évaluer les performances lumineuses, complétées par une lecture à l'échelle du sol pour apprécier la qualité des espaces extérieurs.

A noter que les résultats annuels ne correspondent pas à une moyenne des situations saisonnières, mais à une simulation continue sur l'ensemble de l'année. Chaque période est pondérée par sa durée réelle et par les conditions d'ensoleillement associées, ce qui confère un poids plus important aux périodes estivales et intermédiaires. Cela explique les écarts observés entre les valeurs saisonnières et annuelles.

Pour chacune des variantes étudiées, une planche récapitulative des analyses a été réalisée, synthétisant l'ensemble des indicateurs d'ensoleillement, de rayonnement solaire et de potentiel de lumière du jour. Ces planches permettent une lecture transversale et homogène des performances environnementales de chaque configuration, facilitant ainsi leur comparaison et leur interprétation globale. L'ensemble de ces documents est présenté en annexe (annexe 4). Dans le corps du présent

travail, seule la planche relative à la variante 1 (fig.22) est présentée à titre d'exemple, afin d'illustrer la structure et le contenu des analyses produites. Un tableau récapitulatif (fig.23) regroupant l'ensemble des résultats des différentes variantes est également présenté ci-après. Ce tableau rassemble l'ensemble des indicateurs calculés et constitue une base de comparaison quantitative entre les configurations étudiées.

VARIANTE 1



Figure 22 : Planche récapitulative parmi les 9 variantes (réalisation personnelle)

Informations générales				Heures d'ensoleillement				Rayonnement solaire				Potentiel de lumière du jour	
Vx	Description	Surface de plancher (m²)	Volume Construit (m³)	Hiver (% 8+h)	Mi-saison (% 8+h)	Été (% 8+h)	Annuel (% 8+h)	Hiver (kWh/m²)	Mi-saison (kWh/m²)	Eté (kWh/m²)	Annuel (kWh/m²)	Visibilité du ciel (%)	Angle de 45° (%)
V1	Forme compacte minimale	4 233	13 586	Bât :60% Sol :69%	Bât :74% Sol :77%	Bât :77% Sol :94%	Bât :71% Sol :89%	Bât :27 Sol :31	Bât :169 Sol :237	Bât :278 Sol :433	Bât :663 Sol :966	Bât :94% Sol :100%	Bât :0%
V2	Forme ouverte minimale	2 927	10 109	Bât :90% Sol :36%	Bât :91% Sol :90%	Bât :91% Sol :94%	Bât :91% Sol :87%	Bât :30 Sol :30	Bât :205 Sol :238	Bât :354 Sol :442	Bât :819 Sol :975	Bât :95% Sol :100%	Bât :1%
V3	Forme étalée	7 442	26 048	Bât :85% Sol :6%	Bât :90% Sol :40%	Bât :90% Sol :78%	Bât :89% Sol :12%	Bât :30 Sol :14	Bât :188 Sol :160	Bât :305 Sol :335	Bât :737 Sol :683	Bât :97% Sol :100%	Bât :1%
V4	Forme compacte intermédiaire	19 111	61 425	Bât :83% Sol :14%	Bât :94% Sol :12%	Bât :95% Sol :50%	Bât :92% Sol :22%	Bât :31 Sol :20	Bât :220 Sol :140	Bât :386 Sol :356	Bât :883 Sol :667	Bât :100% Sol :100%	Bât :0%
V5	Forme neutre	18 599	58 453	Bât :79% Sol :10%	Bât :81% Sol :33%	Bât :82% Sol :64%	Bât :80% Sol :18%	Bât :27 Sol :19	Bât :173 Sol :165	Bât :285 Sol :320	Bât :681 Sol :686	Bât :86% Sol :96%	Bât :4%
V6	Forme ouverte intermédiaire	18 379	57 795	Bât :66% Sol :5%	Bât :73% Sol :9%	Bât :73% Sol :54%	Bât :71% Sol :5%	Bât :26 Sol :18	Bât :166 Sol :153	Bât :274 Sol :301	Bât :651 Sol :642	Bât :90% Sol :98%	Bât :2%
V7	Forme dense compacte	26 569	84 136	Bât :88% Sol :29%	Bât :88% Sol :38%	Bât :88% Sol :40%	Bât :88% Sol :36%	Bât :28 Sol :20	Bât :191 Sol :164	Bât :328 Sol :301	Bât :763 Sol :669	Bât :88% Sol :91%	Bât :1%
V8	Forme dense fragmentée	37 187	116 000	Bât :73% Sol :2%	Bât :76% Sol :4%	Bât :76% Sol :17%	Bât :76% Sol :4%	Bât :25 Sol :9	Bât :164 Sol :94	Bât :274 Sol :210	Bât :646 Sol :417	Bât :69% Sol :63%	Bât :12%
V9	Forme dense poreuse	26 284	81 066	Bât :57% Sol :21%	Bât :71% Sol :33%	Bât :71% Sol :57%	Bât :70% Sol :24%	Bât :25 Sol :21	Bât :158 Sol :170	Bât :255 Sol :318	Bât :617 Sol :699	Bât :82% Sol :95%	Bât :2%

Figure 23 : Tableau récapitulatif des résultats de l'analyse des performances d'ensoleillement pour les 9 variantes (réalisation personnelle)

7.4. EVALUATION ET SELECTION DES SOLUTIONS OPTIMALES SELON LE CRITERE DE LA LUMIERE NATURELLE

Dans un premier temps, les résultats du tableau sont analysés au regard des différents indicateurs afin de mettre en évidence les principales tendances entre les différentes variantes.

Concernant les heures d'ensoleillement, les variantes les plus ouvertes (V2 et V3) présentent globalement les niveaux les plus élevés, avec des valeurs annuelles atteignant jusqu'à 91 % en période de mi-saison et en été. À l'inverse, les formes plus compactes ou denses (notamment V1, V5 et V9) affichent des niveaux plus faibles, traduisant une limitation plus importante de l'exposition solaire, en particulier pour les espaces bâtis.

Le rayonnement solaire suit une tendance similaire. Les variantes ouvertes et intermédiaires (V2, V4 et V6) présentent des niveaux annuels plus élevés, avec des valeurs supérieures pour les surfaces extérieures (sol), tandis que les configurations plus compactes ou fragmentées montrent des valeurs plus modérées. Les écarts entre rayonnement sur bâtiment et sur sol sont également plus marqués dans les formes denses, ce qui traduit une exposition moins homogène des volumes bâtis.

Enfin, le potentiel de lumière du jour, évalué à travers la visibilité du ciel, reste globalement élevé pour l'ensemble des variantes, mais atteint ses valeurs maximales dans les configurations les plus ouvertes (V2, V3 et V4). Les variantes plus denses présentent en revanche une légère diminution de cet indicateur, bien que les écarts restent relativement limités. L'angle d'obstruction à 45° reste faible sur l'ensemble des variantes, traduisant un masquage bâti limité à cette échelle d'analyse.

En synthèse, lorsque la densité morphologique (FSI) augmente, on observe globalement une diminution des performances d'ensoleillement, avec des valeurs plus faibles dans les configurations denses (V7, V8 et V9) par rapport aux formes plus ouvertes (V2, V3 et V6), notamment en mi-saison et en été. À l'inverse, une augmentation de l'ouverture (OSR) est associée à une amélioration des heures d'ensoleillement et du potentiel de lumière du jour, les variantes les plus ouvertes présentant les niveaux les plus élevés de visibilité du ciel et d'exposition solaire. Le GSI élevé ne se traduit pas systématiquement par une baisse du rayonnement solaire global, mais accentue en revanche les écarts entre les surfaces bâties et les sols, traduisant une exposition plus hétérogène dans les formes compactes. Ces résultats mettent en évidence une relation directe entre les paramètres morphologiques d'entrée et les performances environnementales simulées. La compacité (FSI), le degré d'ouverture (OSR) et la densité bâtie (GSI) apparaissent ainsi comme des variables structurantes influençant de manière significative les indicateurs d'ensoleillement, de rayonnement solaire et de potentiel de lumière du jour. Les résultats montrent ainsi une sensibilité différenciée des indicateurs aux paramètres morphologiques, le potentiel

de lumière du jour étant particulièrement influencé par le degré d'ouverture, tandis que le rayonnement solaire présente une dépendance plus marquée à la distribution des masses bâties. Cette tendance est cohérente avec la littérature, qui souligne que la forme urbaine, à travers ses dimensions géométriques et son implantation dans le site, influence directement les apports solaires et le niveau d'éclairement (Mahaya, 2014), confirmant ainsi les observations issues des simulations réalisées.

Dans l'ensemble, les résultats montrent une corrélation claire entre la morphologie urbaine et les performances environnementales : les formes plus ouvertes favorisent l'exposition solaire et lumineuse, tandis que les formes compactes ou denses tendent à la réduire, avec des intensités variables selon les indicateurs considérés.

Ces résultats doivent toutefois être interprétés avec prudence, dans la mesure où chaque indicateur solaire renseigne sur une dimension spécifique du comportement environnemental et ne peut, à lui seul, rendre compte de la complexité des phénomènes étudiés. Comme le souligne Czachura, Kanters, Gentile et Wall (2022), les métriques solaires telles que les heures d'ensoleillement, le rayonnement solaire et le potentiel de lumière du jour doivent être mobilisées de manière complémentaire et non isolée, car elles traduisent des réalités différentes : durée d'exposition, quantité d'énergie reçue et qualité de l'éclairement naturel. L'utilisation d'un indicateur unique peut ainsi conduire à des biais d'interprétation, en survalorisant certaines performances au détriment d'autres. Par conséquent, une lecture croisée des indicateurs s'avère indispensable afin de produire une évaluation plus robuste et nuancée des performances solaires, en particulier dans les phases amont de la conception urbaine où les choix morphologiques ont des impacts déterminants. Au regard des limites inhérentes à chaque indicateur pris isolément, le choix des variantes optimales s'appuie sur une lecture croisée des performances en matière d'ensoleillement, de rayonnement solaire et de potentiel de lumière du jour. Cette démarche s'apparente à une logique d'optimisation multicritère, dans laquelle aucune solution ne domine absolument l'ensemble des indicateurs, mais où certaines configurations apparaissent comme des compromis (front de Pareto). Le choix d'une variante optimale ne peut être fondé sur un indicateur unique, mais repose sur une approche multicritère intégrant plusieurs dimensions du potentiel solaire.

Dans cette perspective, une méthode de pondération et de normalisation des indicateurs a été mise en œuvre sous Excel, permettant d'établir un score global de performance et de comparer objectivement les variantes (Ferguson et al., 2025). Cette approche met en évidence l'existence de compromis entre densité urbaine et performances environnementales, conduisant à identifier non pas une solution unique, mais un ensemble de solutions optimales selon les objectifs du projet. Dans le prolongement de la littérature en optimisation des performances architecturales, il est possible d'adopter une approche de type multicritère basée sur une fonction de pondération. Cette méthode permet d'agrèger des indicateurs hétérogènes : ensoleillement, rayonnement solaire et potentiel de lumière du jour en un score global unique, facilitant ainsi la comparaison des variantes morphologiques.

Les indicateurs initiaux étant exprimés dans des unités hétérogènes (pourcentages d'ensoleillement, kWh/m² de rayonnement solaire, indices angulaires et de visibilité du ciel), une normalisation préalable est indispensable afin de garantir leur comparabilité. Sans cette étape, toute agrégation serait biaisée par les différences d'unités et d'amplitudes, rendant impossible une comparaison cohérente entre variantes. Chaque indicateur est donc transformé en variable adimensionnelle comprise entre 0 et 1 selon une normalisation min-max, définie par la relation suivante :

$$I' = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$$

où I correspond à la valeur initiale de l'indicateur, et $I_{\min}$ et $I_{\max}$ aux valeurs minimale et maximale observées parmi l'ensemble des variantes. Cette transformation permet de passer d'un espace de mesures physiques hétérogènes à un espace de performance relative homogène (Ferguson et al., 2025). Elle ne vise pas à uniformiser la signification physique des indicateurs, mais à en permettre la comparaison dans une logique multicritère. Les scores obtenus doivent ainsi être interprétés comme des indices comparatifs d'aide à la décision, et non comme des valeurs physiques absolues. Ils demeurent par ailleurs dépendants du choix des indicateurs, des valeurs extrêmes observées ainsi que des pondérations retenues selon les objectifs du projet. Afin d'obtenir une lecture synthétique des performances morphologiques, les valeurs associées au bâti et au sol ont été agrégées par moyenne arithmétique avant normalisation. Cette simplification permet de représenter chaque variante par un indicateur global unique, facilitant la comparaison multicritère. Néanmoins, cette agrégation tend à atténuer certaines disparités entre performances des volumes bâtis et conditions d'ensoleillement des espaces extérieurs, qui pourraient faire l'objet d'analyses différenciées dans des travaux ultérieurs.

Sur cette base, les scores globaux sont ensuite calculés via une fonction multicritère pondérée, ce qui permet d'établir un classement automatisé des neuf variantes selon une logique de type système d'aide à la décision inspiré des approches d'intelligence artificielle (scoring multicritère).

Variante	Heures ensoleillement	Rayonnement solaire	Potentiel de lumière du jour
V1	0.824	0.774	0.935
V2	1.000	1.000	0.957
V3	0.245	0.488	0.978
V4	0.373	0.666	1.000
V5	0.216	0.416	0.806
V6	0.000	0.315	0.871
V7	0.471	0.505	0.688
V8	0.039	0.000	0.000
V9	0.177	0.346	0.742

Le score global S_v d'une variante est défini comme suit :

$$S_v = w_1 \cdot I_{\text{ensoleillement}} + w_2 \cdot I_{\text{rayonnement}} + w_3 \cdot I_{\text{potentiel de lumière du jour}}$$

avec $w_1 + w_2 + w_3 = 1$. Les indicateurs I correspondent ici à des valeurs synthétiques issues de la moyenne des performances « bâtiment » et « sol », de manière à intégrer la double lecture des résultats. Cette agrégation permet de représenter chaque variante par une performance environnementale globale cohérente, tout en conservant la complexité des phénomènes étudiés.

Afin de tester la sensibilité des résultats et de traduire différentes intentions architecturales, trois scénarios de pondération sont définis.

- Le premier scénario privilégie le confort lumineux intérieur : $w_{\text{ensoleillement}} = 0,20$, $w_{\text{rayonnement}} = 0,30$, $w_{\text{potentiel de lumière du jour}} = 0,50$. Il correspond à une logique de conception centrée sur la qualité d'usage des espaces, où le potentiel de lumière du jour constitue le critère dominant.
- Le deuxième scénario propose un équilibre entre les dimensions énergétiques et lumineuses : $w_{\text{ensoleillement}} = 0,30$, $w_{\text{rayonnement}} = 0,35$, $w_{\text{potentiel de lumière du jour}} = 0,35$, traduisant une approche de compromis adaptée aux contraintes urbaines et programmatiques.
- Le troisième scénario est orienté vers la performance solaire globale : $w_{\text{ensoleillement}} = 0,40$, $w_{\text{rayonnement}} = 0,40$, $w_{\text{potentiel de lumière du jour}} = 0,20$, privilégiant la captation énergétique et l'exposition solaire au détriment relatif de la qualité lumineuse intérieure.

Cette lecture multicritère s'inscrit dans une logique d'aide à la décision basée sur un traitement tabulaire des résultats sous Excel, dans laquelle le classement des solutions n'est pas figé mais dépend directement des objectifs architecturaux définis. Elle permet ainsi de relier les performances environnementales issues des simulations à une interprétation opérationnelle des choix de conception, tout en mettant en évidence les compromis inhérents aux morphologies étudiées.

Le **premier scénario**, orienté vers le confort lumineux, traduit une logique architecturale centrée sur la qualité d'usage des espaces intérieurs. La pondération accorde une importance dominante au potentiel de lumière du jour, considéré comme un enjeu central pour la perception spatiale, le confort visuel et la réduction du recours à l'éclairage artificiel, notamment dans des programmes tels que les bureaux ou les logements. Dans cette configuration, la performance morphologique est principalement évaluée à travers sa capacité à générer une lumière naturelle homogène et qualitative. Les résultats mettent en évidence la domination des variantes V2, V1 et V4. V2, issue d'un encodage caractérisé par une faible densité et une forte ouverture (OSR élevé), constitue la morphologie la plus performante grâce à sa forte perméabilité lumineuse et à son exposition optimale. V1, malgré une ouverture limitée, conserve de bons résultats en raison de sa compacité minimale, favorisant une distribution lumineuse stable et homogène.

V4 s'inscrit comme une morphologie intermédiaire, combinant compacité et performance lumineuse satisfaisante, ce qui en fait une solution de compromis efficace dans ce scénario.

$$S_v = 0.20I'_{\text{ensoleillement}} + 0.30I'_{\text{rayonnement}} + 0.50I'_{\text{potentiel de lumière du jour}}$$

Variante	Score S
V2	0.979
V1	0.864
V4	0.774
V3	0.684
V7	0.590
V5	0.571
V6	0.530
V9	0.510
V8	0.000

Le **deuxième scénario** correspond à une logique d'équilibre environnemental, dans laquelle les performances lumineuses et énergétiques sont considérées de manière relativement équivalente. Cette approche traduit une posture architecturale plus généraliste, adaptée aux contextes urbains contraints, où la morphologie doit concilier simultanément confort d'usage, performance énergétique et exposition solaire. L'objectif est d'identifier des formes bâties capables de maintenir un niveau de performance stable sur l'ensemble des critères, sans privilégier excessivement une dimension au détriment des autres. Dans ce cadre, la variante V2 demeure la solution la plus performante, confirmant sa robustesse globale malgré sa forte ouverture. Les variantes V7 et V4 se distinguent également comme solutions de compromis particulièrement stables : V7, bien que fortement dense, conserve des performances équilibrées grâce à une organisation homogène des masses bâties, tandis que V4, morphologie intermédiaire, assure un compromis efficace entre compacité urbaine et exposition lumineuse. Ce scénario met ainsi en évidence l'intérêt des morphologies hybrides, capables de maintenir des performances cohérentes indépendamment des priorités de pondération.

$$S_v = 0.30I'_{\text{ensoleillement}} + 0.35I'_{\text{rayonnement}} + 0.35I'_{\text{potentiel de lumière du jour}}$$

Variante	Score S
V2	0.985
V1	0.845
V4	0.695
V3	0.587
V7	0.559
V5	0.492
V9	0.434
V6	0.415
V8	0.000

Le **troisième scénario** est orienté vers une optimisation solaire et énergétique de la forme bâtie et s'inscrit dans une approche bioclimatique où la captation des apports solaires constitue l'objectif principal, notamment dans une logique de réduction des besoins énergétiques passifs et de valorisation des gains thermiques. Dans ce contexte, la morphologie est évaluée prioritairement selon sa capacité à maximiser l'exposition solaire et le rayonnement reçu, la qualité de lumière intérieure devenant un critère secondaire. Les résultats confirment la domination de la variante V2, dont la faible densité et la forte ouverture permettent une captation solaire maximale et des performances globalement supérieures. Les variantes V1 et V4 complètent ce classement en raison de leur efficacité relative en exposition solaire, malgré des morphologies plus contrastées. À l'inverse, les configurations fortement denses et peu ouvertes, telles que V7, affichent des performances plus limitées dans ce scénario, en raison d'une réduction de la surface active exposée au rayonnement solaire.

$$S_v = 0.40I'_{\text{ensoleillement}} + 0.40I'_{\text{rayonnement}} + 0.20I'_{\text{potentiel de lumière du jour}}$$

Variante	Score S
V2	0.991
V1	0.826
V4	0.615
V7	0.528
V3	0.489
V5	0.414
V9	0.357
V6	0.300
V8	0.000

La variante V2 apparaît comme la solution dominante dans les trois scénarios, combinant une excellente exposition solaire, un rayonnement élevé et un très bon potentiel de lumière du jour. Elle constitue une solution globalement robuste indépendamment des pondérations. La variante V1 se positionne systématiquement en seconde position, traduisant une forte performance en lumière du jour et une bonne stabilité globale. La variante V4 constitue une solution de compromis particulièrement intéressante, atteignant les meilleures performances en lumière du jour tout en conservant des niveaux élevés de rayonnement solaire. La variante V7 présente un comportement stable mais intermédiaire, ce qui en fait une solution peu sensible aux variations de pondération.

7.5. CONCLUSION DE LA PHASE EXPERIMENTALE

À travers cette partie expérimentale, une démarche de recherche appliquée a été mise en place afin d'analyser l'influence des morphologies urbaines sur les performances environnementales, avec un focus spécifique sur la lumière naturelle, le rayonnement solaire et le potentiel de lumière du jour. En continuité directe avec la problématique de ce travail de fin d'études, cette approche interroge la manière dont les

outils numériques, et plus particulièrement l'intelligence artificielle, peuvent être intégrés au processus de conception architecturale comme outils d'aide à la décision et d'objectivation des choix morphologiques dès les phases amont du projet.

La méthodologie développée articule deux environnements complémentaires. D'une part, une analyse environnementale du site réalisée sur Autodesk Forma permet de caractériser de manière objective les conditions existantes en matière d'ensoleillement, de masques bâtis, de lumière du ciel et de microclimat. Cette étape constitue une base de lecture du territoire, dans laquelle les phénomènes lumineux sont quantifiés et spatialement localisés. D'autre part, ces données sont mobilisées dans un processus de génération de formes via Spacio.ai, où neuf variantes morphologiques sont produites à partir de paramètres d'entrées (FSI, GSI, OSR), traduisant différents degrés de densité, d'occupation du sol et d'ouverture.

Le passage de Forma à Spacio.ai constitue ainsi une articulation méthodologique centrale : l'analyse environnementale ne se limite pas à un diagnostic, mais devient un outil d'alimentation du processus génératif. Les conditions lumineuses du site influencent indirectement la logique de production des formes, inscrivant la génération des variantes dans un cadre environnemental objectivé. Un élément important mis en évidence concerne l'existence d'une rupture de continuité entre les outils utilisés, notamment entre Autodesk Forma et Spacio.ai ; aucun lien direct ne permet actuellement d'assurer une continuité fluide du flux de travail entre l'analyse environnementale et la génération morphologique. Cette rupture oblige à des transferts manuels de données et limite l'intégration d'une véritable boucle itérative entre diagnostic et génération.

Cette limite est également confirmée par l'entretien réalisé avec DGM et Associés (2025). L'agence souligne que les outils d'optimisation et de génération restent encore partiellement déconnectés des analyses environnementales, et s'inscrivent dans un flux de travail fragmenté entre plusieurs logiciels. L'absence d'interopérabilité oblige les équipes à passer par des exportations intermédiaires, ce qui ralentit le processus et renforce le caractère non intégré des outils actuels.

Ainsi, malgré les apports de ces plateformes, la chaîne de conception reste discontinue, et ce manque de continuité constitue aujourd'hui un frein majeur à une intégration pleinement opérationnelle de l'intelligence artificielle dans les phases amont du projet architectural.

Ces morphologies sont ensuite évaluées à travers une série de simulations portant sur trois indicateurs principaux. Sur cette base, une approche de scoring multicritère est mise en œuvre, permettant d'agrèger les performances selon différents scénarios de pondération correspondant à des intentions architecturales distinctes.

Les résultats mettent en évidence de manière récurrente la supériorité des morphologies ouvertes et peu denses, en particulier la variante V2, qui se distingue comme solution la plus performante de manière quasi systématique. Les variantes V1 et V4 apparaissent comme des formes de compromis stables, combinant des performances satisfaisantes avec des logiques morphologiques intermédiaires. À l'inverse, les configurations les plus denses présentent globalement des performances plus limitées en matière d'accès à la lumière naturelle, en raison de la réduction de la visibilité du ciel et de l'augmentation des effets de masque. Cette analyse met en évidence une relation directe entre morphologie urbaine et performance environnementale, tout en confirmant l'absence de solution unique optimale. Les résultats doivent être compris comme un ensemble de compromis, dépendant des priorités de conception définies dans chaque scénario. Dans ce cadre, la démarche proposée permet d'objectiver ces compromis et de les rendre lisibles dans une logique comparative structurée.

Dans le contexte réglementaire wallon, où aucune norme stricte d'ensoleillement n'est imposée mais où la qualité de l'éclairage naturel, le confort des usagers et la performance énergétique constituent des exigences essentielles (CoDT, GRU, règlements communaux), cette approche prend une importance particulière. Elle ne vise pas à produire une solution normative, mais à structurer un outil d'aide à la conception permettant d'éclairer les choix architecturaux dès les phases d'esquisse.

Ainsi, cette partie expérimentale confirme l'intérêt d'une méthodologie combinant analyse environnementale, génération et traitement des résultats sous Excel.

8. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le but de ce travail de fin d'études était de proposer un outil méthodologique d'optimisation des plans à destination des bureaux d'architecture, basé sur l'intelligence artificielle et intégrant un critère environnemental central : la lumière naturelle. L'enjeu principal était de démontrer qu'il est possible d'exploiter des outils d'IA accessibles, ne nécessitant pas de compétences en codage, afin de soutenir le processus de conception architecturale dès ses phases les plus amont.

L'ensemble de la démarche développée dans ce travail a été construit et évalué à partir d'un seul prisme d'analyse, celui de la lumière naturelle. Il est toutefois important de souligner que cette méthodologie n'est pas limitée à cette seule dimension : en conservant le même cadre d'analyse, il serait tout à fait possible d'appliquer ce processus à d'autres critères de performance, qu'ils soient énergétiques, structurels, thermiques ou encore liés à l'usage. L'intérêt de l'approche réside donc moins dans le critère choisi que dans la structure méthodologique elle-même, qui reste transférable et adaptable à d'autres objectifs de conception.

Ce travail a également permis de mettre en évidence le rôle fondamental de l'intelligence artificielle comme outil de soutien à la décision architecturale, et non comme substitut à la réflexion du concepteur. Comme le montrent plusieurs recherches dans ce domaine, l'IA n'a de sens en architecture que si elle est intégrée dans un cadre de conception défini et guidé par l'architecte. Cette idée a également été confirmée par l'entretien réalisé auprès de DGM & Associés (2025), qui souligne que les outils d'IA actuels permettent avant tout d'optimiser le temps de travail et la génération rapide de variantes, davantage que la qualité architecturale elle-même. Cette observation rejoint les résultats de la phase expérimentale de ce TFE, où l'action humaine a joué un rôle essentiel dans la définition des paramètres, des scénarios et des cadres d'interprétation des résultats. L'intelligence artificielle est ainsi utilisée comme un outil d'exploration et de comparaison, tandis que l'architecte conserve un rôle central dans la structuration du projet et l'interprétation des données.

Dans cette logique, la méthode d'optimisation proposée ne se substitue pas au processus de conception architectural traditionnel, mais vient le compléter. Elle constitue un outil d'aide à la décision destiné principalement aux phases préliminaires du projet, notamment la phase d'esquisse. À ce stade, où les choix morphologiques ont un impact déterminant sur la suite du processus de conception, l'intégration d'une approche basée sur la simulation et le scoring multicritère permet d'orienter les décisions, en introduisant des données quantitatives dès les premières intentions de projet.

Ainsi, cette recherche propose une méthodologie hybride, à la fois exploratoire et analytique, combinant génération de formes, simulation environnementale et évaluation multicritère. Elle vise à renforcer le dialogue entre conception architecturale et performance environnementale, en intégrant la lumière naturelle comme un paramètre structurant du projet. Plus largement, ce travail s'inscrit dans une réflexion sur l'évolution des pratiques architecturales face aux outils numériques, et sur la manière dont ceux-ci peuvent contribuer à une conception plus informée et plus rationnelle, tout en maintenant le rôle central de l'architecte dans les choix de conception.

BIBLIOGRAPHIE

Aleti, A., Buhnova, B., Grunske, L., Koziolk, A., & Meedeniya, I. (2012). *Software architecture optimization methods: A systematic literature review*. IEEE Transactions on Software Engineering, 99, 1. <https://doi.org/10.1109/TSE.2012.64>

Attia, S., Gratia, E., Herde, A., & Hensen, J. (2012). *Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design*. 49, 2–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.028>

Badawi, M., Hussein, A., Abdelmonem, A., Badran, A., Ashour, T., Alhuzaihi, O., Yousef, M., & Mohamed, H. (2025). *Integrating BIM, digital twin, GIS, AI, and Autodesk Forma for smart and sustainable cities: A systematic review advancing digital systems for lifecycle management, interoperability, and urban sustainability*. Nile Journal of Architecture & Civil Engineering, 6. <https://njace.journals.ekb.eg/publisher>

Bashir, F. M., Dodo, Y. A., Mohamed, M. A. S., Norwawi, N. M., Shannan, N. M., & Afghan, A. A. (2024). *Effets de la lumière naturelle sur l'amélioration de l'éclairage et de l'efficacité énergétique des bâtiments : vers une faible consommation d'énergie et des émissions de CO₂*. International Journal of Low-Carbon Technologies, 19, 296–305. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad130>

Boyce, P. (2014). *Human factors in lighting* (3rd ed.). <https://doi.org/10.1201/b16707>

Bradner, E., Iorio, F., & Davis, M. (2014). *Parameters tell the design story: Ideation and abstraction in design optimization*. <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/research/publications-assets/pdf/parameters-tell-the-design.pdf>

Canestrino, G. (2021). *Considerations on optimization as an architectural design tool*. Nexus Network Journal, 23(4), 919–931. <https://doi.org/10.1007/s00004-021-00563-y>

Ceylan, S., Şahin, P., Seçmen, S., Somer, M. E., & Süher, H. K. (2024). *The contribution of digital tools to architectural design studio: A case study*. Ain Shams Engineering Journal, 15(7), 102795. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102795>

Chaillou, S. (2019, octobre 7). *L'IA en architecture, séquence d'une alliance*. Medium. <https://medium.com/@sfjchaillou/lia-en-architecture-c805651d7f42>

Chaillou, S. (2021). *L'intelligence artificielle au service de l'architecture*. Le Moniteur.

Cichocka, J., Browne, W., & Rodriguez Ramirez, E. (2015). *Evolutionary optimization processes as design tools: Implementation of a revolutionary swarm approach*. https://www.researchgate.net/publication/305781890_EVOLUTIONARY_OPTIMIZATION_PROCESSES_AS_DESIGN_TOOLS_IMPLEMENTATION_OF_A_REVOLUTIONARY_SWARM_APPROACH

Cichocka, J. M., & Musikhina, E. A. (2014). *Methods of optimization in architecture*. Research Journal of International Studies, 1(20), 109–111. <https://labdigifab.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/02/methods-of-optimization-in-architecture.pdf>

Czachura, A., Kanters, J., Gentile, N., & Wall, M. (2022). *Solar performance metrics in urban planning: A review and taxonomy*. Buildings, 12(4), 393. <https://doi.org/10.3390/buildings12040393>

Dervishaj, A., & Gudmundsson, K. (2023). *Sunlight autonomy for buildings: A new methodology for evaluating sunlight performance in urban and architectural design*. LEUKOS, 21(1), 34–64. <https://doi.org/10.1080/15502724.2023.2297967>

Ferguson, A. J., Hester, D., Huseynov, F., Kim, C.-W., Brownjohn, J., Woods, R., & Bull, L. A. (2025). *On the normalisation and mapping of influence lines*. Mechanical Systems and Signal Processing, 237, 112883. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112883>

He, Z., Wang, Y.-H., & Zhang, J. (2025). *Generative AIBIM: An automatic and intelligent structural design pipeline integrating BIM and generative AI*. Information Fusion, 114, 102654. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102654>

Hillier, B., & Hanson, J. (1984). *The social logic of space*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511597237>

Hong, L., Wang, C., & Zhang, X. (2024). *Daylight availability of living rooms in dense residential areas under current planning regulations: A cross-region case study in China*. Buildings, 14(4), 1090. <https://doi.org/10.3390/buildings14041090>

Hwee, T. K. (2025). *Proceedings of 10th International Conference on Building Materials and Construction: Proceedings of ICBMC 2025*. Springer Nature. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-96-7687-3>

Jia, M. (2021). *Daylight prediction using GAN: General workflow, tool development and case study on Manhattan, New York*. <https://doi.org/10.7298/xz3w-yc87>

Koch, D. (2016). *On avoidance: Reflections on processes of socio-spatial structuring*. *Civil Engineering and Architecture*, 4, 67–78. <https://doi.org/10.13189/cea.2016.040204>

La Biennale di Venezia. (2025). *Biennale Architettura 2025 | 19th Exhibition*. <https://www.labiennale.org/en/architecture/2025/19th-exhibition>

Li, Y., Chen, H., Yu, P., & Yang, L. (2025). *A review of artificial intelligence in enhancing architectural design efficiency*. *Applied Sciences*, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/app15031476>

Mahaya, C. (2014). *Optimisation de la forme urbaine par l'évaluation du potentiel solaire*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12855.19366>

March, L. (2011). *Forty years of shape and shape grammars, 1971–2011*. *Nexus Network Journal*, 13(1), 5–13. <https://doi.org/10.1007/s00004-011-0054-8>

Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). *Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings*. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 41–57. <https://doi.org/10.1191/1365782805li128oa>

Nagy, D., Lau, D., Locke, J., Stoddart, J., Villaggi, L., Wang, R., Zhao, D., & Benjamin, D. (2017). *Project Discover: An application of generative design for architectural space planning*. <https://doi.org/10.22360/simaud.2017.simaud.007>

Nguyen, A. T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). *A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis*. *Applied Energy*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

Ostojić, S., Veršić, Z., & Mrinjek Kliska, N. (2026). *Assessment of criteria for residential buildings' insolation: A comparative review of European standards*. *Architecture*, 6(1), 34. <https://doi.org/10.3390/architecture6010034>

Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). *Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design*. *LEUKOS*, 3(1), 7–31. <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2006.03.01.001>

Reinhart, C., & Wienold, J. (2011). *The daylighting dashboard: A simulation-based design analysis for daylit spaces*. *Building and Environment*, 46, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.08.001>

Sadeghipour Roudsari, M., & Pak, M. (2013). *Ladybug: A parametric environmental plugin for Grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design*. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 3128–3135. https://www.researchgate.net/publication/287778694_Ladybug_A_parametric_environmental_plugin_for_grasshopper_to_help_designers_create_an_environmentally-conscious_design

Singh, S., & Kensek, K. (2014). *Early design analysis using optimization techniques in design/practice*. In *ASHRAE Conference Proceedings* (pp. 284–291). ASHRAE.

Stals, A., Jancart, S., & Elsen, C. (2016). *How do small and medium architectural firms deal with architectural complexity? A look into digital practices*. *eCAADe 2016 - Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, 34th Annual Conference. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/196234>

Stiny, G., & Gips, J. (1971). *Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture*. *IFIP Congress*, 71, 1460–1465. https://www.researchgate.net/publication/221329330_Shape_Grammars_and_the_Generative_Specification_of_Painting_and_Sculpture

Stiny, G., & Mitchell, W. J. (1978). *The Palladian grammar*. Environment and Planning B: Planning and Design, 5(1), 5–18. <https://doi.org/10.1068/b050005>

Union européenne. (2024). *Règlement (UE) 2024/1689 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024 établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle (Artificial Intelligence Act)*. Journal officiel de l'Union européenne. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32024R1689>

Université de Liège. (2023). *Charte d'utilisation des intelligences artificielles génératives dans les travaux universitaires*. https://www.student.uliege.be/cms/c_19230399/fr/faq-student-charte-uliege-d-utilisation-des-intelligences-artificielles-generatives-dans-les-travaux-universitaires

Vernez Moudon, A. (1994). *Getting to know the built landscape typomorphology*. Scribd. <https://www.scribd.com/doc/315172417/Moudon-1994>

Wortmann, T. (2017). *Opossum—Introducing and evaluating a model-based optimization tool for Grasshopper*, 283–292. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2017.283>

Wortmann, T., & Nannicini, G. (2017). *Introduction to architectural design optimization*. In Springer Optimization and Its Applications (pp. 259–278). https://doi.org/10.1007/978-3-319-65338-9_14

Zeshan, A., & Dickinson, S. (2024). *Meta-morphing architectural domains: The role of humans and AI in post-human architecture*. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0621-1_30

Zhang, R., Xu, X., Liu, K., Kong, L., Wang, X., Zhao, L., & Abuduwayiti, A. (2024). *Does architectural design require single-objective or multi-objective optimisation? A critical choice with a comparative study between model-based algorithms and genetic algorithms*. Frontiers of Architectural Research, 13(5), 1079–1094. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.03.010>

Zhang, Y., Chen, W., & Zhu, K. (2025). *A study on the factors influencing sunlight in block layout: A case study of Barcelona sample*. Buildings, 15(7), 1018. <https://doi.org/10.3390/buildings15071018>

SITOGRAPHIE

Architectures. (s. d.). Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://architectures.com/en>

Atmos lab. (s. d.). Atmos Lab. Consulté le 6 février 2026, à l'adresse <https://atmoslab.io/fr>

Autodesk Forma Building Design. (s. d.). Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://www.autodesk.com/products/forma-building-design/overview>

Bakkeli, H. (s. d.). Introduction to daylight potential analysis. Autodesk Forma Site Design. Consulté le 23 février 2026, à l'adresse <https://help.autodeskforma.com/en/articles/6951302-introduction-to-daylight-potential-analysis>

Bakkeli, H. (s. d.). Introduction to the solar energy analysis. Forma Site Design Support Knowledge Base. Consulté le 23 février 2026, à l'adresse <https://help.autodeskforma.com/en/articles/8281900-introduction-to-the-solar-energy-analysis>

Bakkeli, H. (s. d.). Introduction to the sun hours analysis. Autodesk Forma Site Design. Consulté le 23 février 2026, à l'adresse <https://help.autodeskforma.com/en/articles/6951253-introduction-to-the-sun-hours-analysis>

Bayle. (s. d.). Autodesk Forma – Analysez vos projets d'aménagements urbains – Village BIM. Consulté le 23 février 2026, à l'adresse <https://blogs.autodesk.com/villagebim/2023/06/nouveaute-autodesk-forma-analysez-vos-projets-damenagements-urbains.html>

ClimateStudio. (s. d.). Solemma. Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://www.solemma.com/climatestudio>

Finch. (s. d.). Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://www.finch3d.com/>

Forma Site Design. (s. d.). Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://www.autodesk.com/be-fr/products/forma/overview>

Hypar. (s. d.). Hypar. Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://hypar.io/>

Magazine, A. E. C. (2023, janvier 30). Finch3D : Automates the generation of floor plans. AEC Magazine. <https://aecmag.com/ai/finch3d-starts-to-sing/>

Maket | AI-Powered Floor Plan Creation. (s. d.). Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://www.maket.ai/>

NU DESIGN SPACES | DISCOVER : Our Digital Asset Resources. (s. d.). NU DESIGN SPACES. Consulté le 23 février 2026, à l'adresse <https://www.nudesignspaces.com/discover-digital-assets/p/finch-3d>

PlanFinder. (s. d.). Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://www.planfinder.xyz>

Spacio.ai. (s. d.). Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://spacio.ai/>

Superficie habitable. (s. d.). Le logement en Wallonie. Consulté le 3 novembre 2025, à l'adresse <https://logement.wallonie.be/fr/page/criteres-de-superficie-habitable>

TestFit. (s. d.). Consulté le 10 mars 2026, à l'adresse <https://www.testfit.io/>

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : input et output génération de plans d'appartements (Chaillou, 2019)	21
Figure 2 : Panneau de démonstration parmi les 68 exposés (D'Agostino et al., 2021).....	22
Figure 3 : Procédure d'optimisation retenue par Chafik Mahaya (2014).....	24
Figure 4 : Visualisation photoréaliste issu de velux (VELUX Group, n.d.)	27
Figure 5 : Analyse de la maison Cépé (Atmos Lab, 2019)	31
Figure 6 : Résultats de simulation et de prédiction de 8 images d'entrée issues de l'ensemble de test (Jia, 2021)	32
Figure 7 : Top 5 des logiciels IA par fonctionnalités ICBMC 2025	35
Figure 8 : résultats ICBMC (Hwee, 2025)	36
Figure 9 : tableau comparatif des logiciels IA (réalisation personnelle)	44
Figure 10 : vue satellite de la zone de projet (Google Earth)	49
Figure 11 : schéma du processus méthodologique (réalisation personnelle)	51
Figure 12 : modélisation du site de projet sur Autodesk Forma (réalisation personnelle, Autodesk Forma)	52
Figure 13 : Analyse des heures d'ensoleillement du cas d'étude (réalisation personnelle, Autodesk Forma)	54
Figure 14 : tableau des conditions de lumière du jour attendues pour différentes plages de scores VSC (Bakkeli, s.d.).....	55
Figure 15: analyse du potentiel de lumière du jour (réalisation personnelle, Autodesk Forma)	56
Figure 16 : tableau sur l'étude de l'ombre aux solstices et équinoxes du cas d'étude (réalisation personnelle, Autodesk Forma)	59
Figure 17: tableau sur l'étude du microclimat aux solstices et équinoxes du cas d'étude (réalisation personnelle, Autodesk Forma)	62
Figure 18 : tableau récapitulatif des résultats de l'analyse du microclimat (réalisation personnelle, Autodesk Forma)	62
Figure 19: analyse de l'énergie solaire (réalisation personnelle, Autodesk Forma)	64
Figure 20 : Zone définie pour la génération de plans	66
Figure 21 : définition des variables d'entrée pour chaque variante	67
Figure 22 : Planche récapitulative parmi les 9 variantes (réalisation personnelle).....	69
Figure 23 : Tableau récapitulatif des résultats de l'analyse des performances d'ensoleillement pour les 9 variantes (réalisation personnelle)	70

ANNEXES

ANNEXES 1 : TRANSCRIPTION INTERVIEW UMAN

Interview réalisée le 11 février 2026

Objectifs de l'entretien :

- Comprendre les attentes des professionnels vis-à-vis d'un outil d'aide à la conception
- Comprendre les usages existants ou envisagés de l'IA dans le processus de conception architecturale
- Comprendre les contraintes techniques, organisationnelles et temporelles liées à l'intégration d'un tel outil dans un bureau d'architecture
- Identifier les critères prioritaires dans l'optimisation des plans de logements en pratique professionnelle
- Alimenter la réflexion éthique et critique sur l'usage de l'IA dans la production architecturale

Le bureau :

- Né du rapprochement de 3 bureaux wallons (Pierre Maes & associés, HP-architecture et UMAN architect)
- UMAN conçoit des projets variés : logements, équipements publics ou espaces tertiaires
- UMAN possède une entité spécialisée dans les projets d'habitation et d'aménagement intérieur.

Questions types :

- Comment est née la réflexion autour de l'intelligence artificielle au sein du bureau ?
- Pourriez-vous m'expliquer le fonctionnement de cette cellule de réflexion sur l'IA et le développement ?
- Quels profils y participent (architectes, ingénieurs, développeurs, partenaires externes...) ?
- À quels types de problématiques l'IA est-elle envisagée comme réponse aujourd'hui chez UMAN ?
- S'agit-il plutôt d'une veille, d'expérimentations concrètes ou de projets déjà intégrés dans la pratique ?
- À quels moments du processus de conception pensez-vous que l'IA pourrait apporter une réelle valeur ajoutée ?
- Utilisez-vous déjà des outils d'analyse (facteur de lumière du jour, simulations, etc.) ?
- Quelles seraient, selon vous, les conditions pour qu'un bureau d'architecture adopte réellement ce type d'outil ?
- Qu'est-ce qui pourrait constituer un frein (temps, formation, fiabilité, responsabilité...) ?

[Laura Lebrun]

Comment est née la réflexion autour de l'intelligence artificielle au sein du bureau ?

[Collaborateur du bureau UMAN]

Au sein du bureau, il y a beaucoup de jeunes et sur les PC, ChatGPT est souvent ouvert. Donc, l'intégration de l'intelligence artificielle est venue assez naturellement. C'est également pratique pour analyser les cahiers des charges lors des marchés publics.

Il y a un infographiste dans l'équipe, mais c'est pratique d'avoir l'IA pour faire des rendus ou des montages rapides.

[Laura Lebrun]

Pourriez-vous m'expliquer le fonctionnement du lab intelligence artificielle au sein du bureau UMAN ?

[Collaborateur du bureau UMAN]

Le lab compte 4 ou 5 personnes. Nous avons une réunion tous les quelques mois, avec des tâches attribuées à chacun et des axes qui nous dirigent, notamment l'axe image, qui est important.

Les IA utilisées sont ChatGPT, Copilot et NotebookLM pour tout ce qui est analyse des cahiers des charges et aide à la rédaction. Pour les aspects graphiques, nous utilisons Gemini Pro et Nanobanana pour tester la faisabilité et obtenir des rendus.

Il faut faire attention en présentant une image générée par IA, car cela peut être mal perçu. Cependant, cela reste une solution pratique pour montrer rapidement quelque chose au client. Cela fonctionne très bien en phase de recherche, mais pas pour un produit fini.

À noter également que dans le bureau, il y a une IA qui coordonne les collaborateurs, par exemple pour la réservation de salles, et qui peut aussi résumer les réunions.

[Laura Lebrun]

À quels moments du processus de conception pensez-vous que l'IA pourrait apporter une réelle valeur ajoutée ?

[Collaborateur du bureau UMAN]

C'est facile pour montrer rapidement quelque chose à l'infographiste. Après un certain moment, ça perd de son sens : il faut rester maître de l'IA.

J'avais regardé le logiciel Finch 3D, mais je ne l'ai pas testé et il est assez cher à l'année. Finch 3D est plus facile à utiliser avec Revit apparemment. Depuis quelques semaines, il est possible de l'utiliser avec Archicad, que nous utilisons au bureau. Les autres logiciels semblent moins concrets. Finch est le seul intéressant, mais pas pour le prix, car il ne servirait qu'en début de projet.

Je trouve que c'est encore compliqué de demander à l'IA de générer des volumes pour le moment.

[Laura Lebrun]

Utilisez-vous déjà des outils d'analyse (facteur de lumière du jour, simulations, etc.) ?

[Collaborateur du bureau UMAN]

Oui, nous utilisons AirPlan pour le dépôt de permis d'urbanisme, QGIS pour les courbes de niveau et PICC. Nous avons également testé la génération d'images par Nvidia, mais cela créait parfois des appartements avec des pièces sans portes.

[Laura Lebrun]

Quelles seraient, selon vous, les conditions pour qu'un bureau d'architecture adopte réellement ce type d'outil ?

[Collaborateur du bureau UMAN]

Déjà les patrons poussent à l'utilisation. Si nous ne l'utilisons pas, nous risquons de prendre du retard par rapport aux autres bureaux. Cela fait gagner du temps.

Figma est pratique pour les “one-shot”, mais il n’est pas possible de régénérer sans modifier un facteur. Avec Wist et la licence Adobe, on peut garder le même prompt et conserver l’image de base pour régénérer.

Comfy, une interface Python similaire à Rhino et Grasshopper, permet d’acheter des modèles en ligne, mais ils sont limités pour l’architecture. Il faut être formé pour utiliser Comfy, ce qui implique de payer un salaire supplémentaire. L’avantage est que tout cela permet de générer de multiples variantes.

Nous avons déjà connu des “accidents SketchUp” qui ont donné lieu à des projets avec des volumes étonnants. Nous allons désormais connaître des “accidents IA”.

[Laura Lebrun]

Qu’est-ce qui pourrait constituer un frein (temps, formation, fiabilité, responsabilité...) ?

[Collaborateur du bureau UMAN]

Dans l’annexe 4 des dossiers de soumission, où il faut décrire le projet, les textes sont parfois mal rédigés à cause de l’IA. Les arguments ne sont pas toujours pertinents. Mais tout le monde n’est pas écrivain dans les bureaux, donc cela peut aider.

Il y a aussi la phase “hallucination” où l’IA évolue très vite. On peut passer plus de temps à générer des variantes par IA qu’à les faire à la main. Nous sommes actuellement dans une phase de transition.

Certaines personnes refusent l’enregistrement des réunions pour éviter que l’IA ne génère des résumés. Cela peut être gênant, car parfois des bêtises sont dites ce qui est normal humainement mais l’IA enregistre tout. Cependant, pour les réunions longues et complexes, cet outil reste pratique.

[Laura Lebrun]

Protection des données : avez-vous des craintes ?

[Collaborateur du bureau UMAN]

Oui et non. La protection est bien mise en place dans l'entreprise. Copilot est lié à une licence entreprise, donc la sécurité des données est normalement garantie dans le contrat.

Il y a surtout des inquiétudes avec les plateformes en ligne. Il est impensable de mettre de l'IA sur le serveur local contenant les documents du bureau, de peur de donner accès à des personnes non autorisées.

Ajouté en fin d'entretien :

[Collaborateur du bureau UMAN]

J'utilise parfois Mass to Image pour réaliser des tests de type « form-finding » à partir de prompts, et les résultats sont intéressants.

L'intelligence artificielle ne réalise pas le projet à la place de l'architecte : elle constitue un outil à diriger, et non un outil qui dirige.

À la fin de l'entretien, le collaborateur s'est également intéressé aux différents logiciels explorés dans le cadre de cette recherche, témoignant de l'intérêt porté aux usages actuels de l'intelligence artificielle dans la pratique architecturale.

ANNEXE 2 : TRANSCRIPTION INTERVIEW DGM

Interview réalisée en visio-conférence le 3 décembre 2025

Objectifs de l'entretien :

- Comprendre pourquoi et comment DGM a choisi d'intégrer des logiciels d'optimisation/IA dans ses processus de conception.
- Identifier les critères d'optimisation effectivement employés (confort lumineux, orientation, compacité, flux, etc.).
- Évaluer les impacts concrets de ces outils sur les projets, notamment les projets d'envergure modeste : gain de temps, qualité spatiale, itérations, communication client.
- Repérer les limites ou réticences à l'adoption de ces technologies dans la pratique quotidienne d'une agence d'architecture.

Le bureau :

- DGM & Associés est une agence d'architecture fondée en 1987, avec environ 80 collaborateurs.
- Géographiquement, l'agence intervient principalement en région parisienne
- S'attache à concevoir des espaces de vie toujours plus écologiques, en se fixant des impératifs environnementaux des plus exigeants, et intégrant les innovations techniques et technologiques en perpétuelles évolutions.

Questions types :

- Comment avez-vous découvert et choisi le logiciel que vous utilisez (Finch3D) ?
- À quel stade du projet l'utilisez-vous et comment s'intègre-t-il dans votre workflow (modélisation, export, simulation) ?
- Quels critères de confort ou environnementaux optimisez-vous avec cet outil (lumière naturelle, orientation, ventilation, circulation, confort thermique...) et pouvez-vous donner un exemple concret ?
- Quels bénéfices concrets et quelles limites avez-vous observés dans l'utilisation de cet outil sur vos projets (gain de temps, qualité spatiale, itérations, communication client...) ?
- Quelles pratiques adoptez-vous pour protéger les données sensibles de vos projets lors de l'utilisation de ces logiciels et avez-vous des réticences à les utiliser ?
- Avez-vous reçu une formation préalable pour l'utiliser, ou l'avez-vous appris de manière autonome ?

[Laura Lebrun]

Comment avez-vous découvert et choisi le logiciel Finch3D ?

[Thibaud Bronchart]

On cherchait à s'approprier l'intelligence artificielle ; en sentant qu'on ne pourrait pas passer à côté. Et donc, il fallait s'y pencher. On a cherché pleins de moyens de l'utiliser dans notre quotidien, dans notre workflow. Et on est tombé assez rapidement sur Finch, comme tout le monde sur leur marketing sur LinkedIn, avec cet appartement qui évolue en fonction du stretch. Et on s'est dit que ça pouvait être intéressant. On est allé très vite avec eux, alors que leur produit était quand même loin d'être au point. Ça fait un moment qu'on est avec eux. Aujourd'hui, c'est beaucoup mieux. Aussi, ce qui nous a intéressés, c'est de le développer avec eux. Donc, pourquoi on y est allé ? On ne voulait pas manquer l'opportunité de l'intelligence artificielle, donc l'opportunité d'aller plus vite dans ce qu'on faisait. Pas de faire différent, mais de faire plus rapidement pour pouvoir faire plus. Malheureusement, sans être payé plus, mais pour pouvoir faire plus.

[Laura Lebrun]

Justement, vous disiez que vous intégrez cela dans votre workflow. Ça s'intègre à quelle phase du projet ?

[Karina Pak]

Cela se situe plutôt au début du projet, au stade de la faisabilité. C'est le moment où le volume n'est pas encore défini, où l'on peut faire évoluer la volumétrie et mener une recherche sur la typologie.

[Laura Lebrun]

D'accord. Et vous le travaillez avec un autre logiciel en parallèle ?

[Karina Pak]

Oui. On est une agence qui travaille avec comme logiciel principal ArchiCAD. Après, par exemple, Thibaut fait partie des équipes qui travaillent sur Revit. La complexité avec Finch, c'est qu'au tout début, il fallait passer plutôt par Rhinoceros. Donc, ça veut dire qu'il faut de toute façon ressortir le plan en format DWG ou PDF et le redessiner. Et peut-être un an plus tard, un an et demi plus tard, ils ont intégré le plugin sur Revit ou Autodesk. Donc, aujourd'hui, il y a la possibilité de générer les appartements et les typologies directement depuis Revit. Mais pour les utilisateurs ArchiCAD, ça reste toujours plus compliqué. Pour ça, il faut transformer le fichier de base qui est sur ArchiCAD vers le fichier Revit, soit passer par Rhinoceros. Mais on attend avec impatience le début de l'année 2026 parce que là, ils travaillent activement sur l'intégration, sur les liens entre ArchiCAD et Finch.

[Thibaud Bronchart]

Jamais exclusivement le logiciel d'optimisation. C'est toujours une aide à côté.

[Laura Lebrun]

Et par rapport au logiciel d'optimisation, est-ce que vous avez dû recevoir une formation préalable pour savoir l'utiliser ou vous l'avez appris de manière autonome ?

[Thibaud Bronchart]

Oui, ils nous ont formés rapidement.

[Karina Pak]

Ils organisent des séances d'onboarding pendant lesquelles on peut poser des questions. Au début, ils nous présentaient surtout l'interface, son fonctionnement et les outils. Et c'est aussi là un vrai avantage : aujourd'hui, on est en réelle communication avec eux. Dès qu'on rencontre un souci ou que quelque chose ne fonctionne pas bien, on peut poser des questions, les appeler, envoyer des messages, et ils sont très efficaces. Et ici, parce que l'IA reste toujours pas très stable aujourd'hui, c'est un plan de développement. Et la problématique, si on teste une autre IA, parfois c'est un peu compliqué. C'est pas toujours très intuitif. Et on a plein de questions. Comment on les utilise ? Qu'est-ce qui se passe ? Comment on peut faire ? Et en fait, on ne peut pas les poser. Et l'avantage de Finch, on a les interlocuteurs.

[Laura Lebrun]

Et concernant les projets que vous développez avec Finch, quels sont les critères que vous cherchez à optimiser ? S'agit-il de critères de confort, environnementaux, de lumière naturelle, d'orientation, de ventilation ou encore de circulation au sein des logements ou des projets ?

[Thibaud Bronchart]

Finch a encore peu exploré la dimension environnementale, la partie solaire. Ça se sent dans ce qu'il génère, ça manque un peu de lumière. En revanche on a plutôt une bonne optimisation des circulations, de l'aspect traversant ou pas. Ce sont des critères que nous connaissons. Mais il n'ira pas jusqu'à l'orientation, ces choses-là, ça reste à nous de choisir. Finch va nous permettre de générer pas mal de variantes sur des critères qui sont plutôt techniques, à distribuer les chambres, dans l'épaisseur du bâtiment, etc. Ça va être à nous de choisir parmi les variantes celle qui va être la plus intéressante sur des critères plus environnementaux. Pour l'instant, je pense que c'est trop complexe pour l'IA, ce genre d'arbitrage. Parce qu'en réalité, c'est toujours arbitré entre un salon au sud, mais en même temps, ma chambre, j'ai besoin qu'elle soit de ce côté-là, mais mon organisation intérieure, c'est quelque chose qui, pour l'instant, l'IA saura faire, mais ne saura pas choisir, ne saura pas arbitrer, parce que c'est le plus important. Entre avoir une bonne orientation solaire, oui, mais le balcon du bon côté, parce qu'en fait, le soleil, certes, il est de ce côté-là, mais j'ai une voie très passante avec beaucoup de routes et qui fait beaucoup de bruit, donc je ne vais pas mettre ma chambre ici. Ces arbitrages-là qui resteront, je pense et j'espère, encore très longtemps entre nos mains, et pas entre celles de l'intelligence artificielle.

[Laura Lebrun]

J'avais une question à ce sujet, à laquelle vous avez déjà en partie répondu, sur les bénéfices concrets et les limites que vous avez observés avec ce type de logiciel. Au-delà de celles que vous avez mentionnées, en voyez-vous d'autres, que ce soit dans la façon de travailler ou dans les qualités spatiales que ces outils permettent d'atteindre ?

[Karina Pak]

Globalement, on a toujours des bâtiments qui ne sont pas très rectangulaires. Il y a toujours des formes un peu complexes. Ça dépend des parcelles, des gabarits. C'est un peu compliqué, je pense, d'apprendre l'IA de faire, on va dire, des appartements parfaits parce que c'est compliqué

même pour nous quand on dessine à la main. Mais ce que nous donne aujourd'hui la génération des appartements grâce à l'IA, c'est plutôt les variantes qu'on peut arbitrer.

[Thibaud Bronchart]

On n'a pas de bénéfice architectural, c'est-à-dire que l'IA ne saura pas faire mieux que nous pour l'instant, mais elle va permettre de faire des représentations de ce qu'on pourrait avoir en tête, beaucoup plus vite, de faire plein de tests là où nous, le temps qu'on dessine à la main/souris, ça nous prendrait déjà du temps et donc, il y a un moment, il faut rendre le projet et donc, on n'a pas trois semaines pour faire 50 variantes donc peut-être qu'il y a une variante qui va nous échapper. Ce que nous apporte l'IA, ça va être plus l'optimisation du temps, et non pas l'optimisation de l'architecture et des critères environnementaux.

[Karina Pak]

Je pense qu'aujourd'hui, ça reste une sorte d'outil qu'on utilise comme d'autres logiciels et ce n'est pas forcément que l'IA va remplacer un architecte qui va faire le projet.

[Thibaud Bronchart]

En revanche, sur les questions environnementales, des IA comme Forma et un peu Spatio proposent davantage d'analyses. Forma, notamment, est assez intéressant à l'échelle urbaine : sur des périmètres aussi vastes, on peut déjà percevoir à l'œil des phénomènes comme l'ensoleillement. En revanche, cela ne permet pas encore de mener une analyse thermique précise. A l'échelle urbaine, il y a plus d'impacts environnementaux. A l'échelle d'un bâtiment, pour l'instant, c'est encore léger, je trouve. Je pense que j'espère que ça va venir. Il faudra que cela évolue si la réglementation suit. Je parle ici de la réglementation française. Nous avons des critères et des obligations environnementales à respecter selon la loi. Aujourd'hui, la plupart des éléments architecturaux disons, des ornements qui servent à protéger du soleil ne sont pas vraiment pris en compte dans cette réglementation. Et du coup, ce que pourrait nous permettre l'IA, c'est d'avoir des choses encore plus folles pour se protéger du soleil, je simplifie, mais ça ne compterait pas dans les calculs environnementaux de l'État. Et du coup entre guillemets, ça ne nous sert à rien, puisqu'on doit rentrer dedans. Donc ça, c'est une évolution de la réglementation qui sera nécessaire pour amener les vraies avancées de l'IA sur ces domaines-là, je pense.

[Laura Lebrun]

Avant Finch, avez-vous utilisé d'autres intelligences artificielles d'optimisation ? Et si oui, pourquoi avez-vous choisi de conserver Finch plutôt qu'une autre ?

[Karina Pak]

En génération d'appartements on a testé ARCHITECTURES avec un S, c'est une IA qui vient d'Espagne. Et en fait, c'était pas très facile à manipuler. Je pense qu'on s'est arrêtés assez vite, parce que c'était compliqué de vraiment développer le volume. Et comme encore une fois, on n'a pas eu une personne en face de nous qui est capable de répondre à nos questions, on a vite abandonné.

[Thibaud Bronchart]

Après, tu as testé Spatio aussi.

[Karina Pak]

J'ai testé Spatio aussi, c'est à peu près la même chose. Certaines choses y sont plus faciles, mais d'autres moins. Il faut souvent chercher comment optimiser le dessin ou le volume, parce que certains clics ne fonctionnent pas toujours comme on le souhaiterait. Spatio est bien. Un autre point concernant Finch : aujourd'hui, si l'on a besoin de modifier le volume, il faut passer par nos logiciels de base avant de retravailler sur Finch. Il nous manque donc une interface commune permettant de modifier le volume et de relancer la génération des plans en même temps. Spatio semblait pouvoir être une alternative au début du projet pour le volume, avant d'intégrer ensuite Finch. Pour l'instant, les résultats n'ont pas été très performants, donc c'est à suivre.

[Thibaud Bronchart]

Egalement, il y a les IA de génération d'images, c'est encore autre chose. Mais on a un pôle 3D ici qui l'utilise aussi.

[Laura Lebrun]

Par curiosité, vous savez lesquelles sont utilisées ?

[Karina Pak]

Oui, nous utilisons StableDiffusion, via l'interface Config UI. Cela concerne les modèles et le paramétrage de la chaîne géométrique ambiante, un peu comme sur Grasshopper. C'est un peu complexe, mais assez intéressant. Aujourd'hui, cela nous sert surtout pour ajuster la résolution ou ajouter de petits détails. L'objectif n'a pas été de créer des formes vraiment compliquées.

[Thibaud Bronchart]

Pour modifier, j'utilise de plus en plus Nanobanana avec gemini. C'est vraiment la correction et c'est assez utile. Il y avait Veras pendant le moment, mais je n'ai pas été très satisfait du résultat. Donc on ne l'a pas gardé.

[Karina Pak]

La dernière fois, nous avons utilisé ChatGPT pour générer des textures. Nous avons un projet avec un environnement assez particulier, où il était difficile de retrouver les mêmes textures. Nous avons utilisé des extraits de Google Maps et ChatGPT a créé des textures qui fonctionnaient plutôt bien. Nous avons testé un peu partout : Nanpbanana, MidJourney... mais au final, c'est ChatGPT qui a donné les meilleurs résultats.

[Laura Lebrun]

Une question sur la protection des données : est-ce que vous avez des réticences sur la manière dont vos données sont utilisées dans ces logiciels ?

[Thibaud Bronchart]

À l'échelle de l'agence, avec Finch, nous avons un contrat qui garantit que nos plans ne sont pas utilisés par leur intelligence artificielle pour d'autres clients, mais uniquement pour nous. Cela dit, nos plans ne contiennent rien de réellement privé : ce que nous vendons, ce sont nos compétences, bien au-delà de la qualité des plans eux-mêmes. À titre plus personnel, pour d'autres IA comme ChatGPT ou Gemini, c'est un sujet plus complexe. Cela dépend de l'usage : dès qu'on travaille sur des présentations, des concours ou des appels d'offres confidentiels, il faut être très prudent, car ces données deviennent de plus en plus sensibles. Je dirais que, pour la production architecturale, non. En termes de génération de plans, parce que c'est ce sur quoi nous

travaillions, c'est différent. Pour les images, de toute façon, on ne les contrôle pas : n'importe qui peut prendre une photo du bâtiment une fois construit, malheureusement. Mais c'est vrai que c'est plus délicat. Par exemple, l'autre jour, je devais préparer des schémas pour une présentation de concours, j'étais en retard et je n'avais qu'une heure, donc j'ai fait générer les schémas par Gemini. Il m'a généré d'office des schémas dans le style de BIG, de Bjarke Ingels, et c'était très bien. J'avoue que je ne maîtrise pas assez Illustrator pour produire des schémas d'une telle qualité. Mais cela pose la question de l'identité : ces schémas ont clairement le style de BIG. Finalement, on les a tous repris, et honnêtement, si je les avais faits moi-même, j'aurais probablement fait pareil, car ce sont les plus percutants aujourd'hui. Cependant, il y a des situations où ça soulève un vrai questionnement : si demain je demande à l'IA de générer un bâtiment ou une façade proche de mon projet, et que je me retrouve avec une façade déjà reconnaissable, là ça pourrait poser problème. Mais en même temps, c'est relatif : si je finis par créer un bâtiment qui ressemble au voisin, c'est moi qui l'ai fait, ce n'est pas l'IA.

[Karina Pak]

La question n'est pas seulement liée à l'arrivée de l'IA. Même avant, on se référait toujours à des bâtiments existants, à des projets, à leurs qualités, et on réutilisait beaucoup de ce qui existait déjà. La vraie question est : jusqu'à quel point réinterprète-t-on ces références, ajoute-t-on des éléments personnels et travaille-t-on avec l'environnement et les contraintes ? Va-t-on simplement copier un bâtiment existant ? D'ailleurs, il y a des cas où cela a été fait, sans l'IA.

[Laura Lebrun]

Aujourd'hui, diriez-vous que vous utilisez ces logiciels d'optimisation sur tous les projets du bureau, ou plutôt sur une minorité ?

[Thibaud Bronchart]

C'est vraiment une minorité pour l'instant. Ce n'est pas seulement une question de projets, mais aussi de personnes prêtes à utiliser le logiciel et à se former. Aujourd'hui, dans l'agence, nous ne sommes que deux à l'utiliser sur soixante-dix personnes. On prévoit de l'étendre progressivement, mais, d'un point de vue workflow, cela reste un logiciel nouveau. Qu'il y ait de l'IA ou non, imaginer qu'on passe du jour au lendemain d'un outil à un autre nécessite de former les équipes. Il faut les familiariser avec le logiciel, avec les erreurs possibles de l'IA, ainsi qu'avec ses avantages et limites,

pour que l'intégration se fasse correctement. Pour l'instant, c'est donc vraiment une minorité de projets, principalement des phases de faisabilité, et ça reste du prototype ou du test.

[Laura Lebrun]

Est-ce que vous connaissez d'autres agences, en France ou à l'international, qui utilisent ces outils d'optimisation ?

[Thibaud Bronchart]

Alors, je sais que sur le site de Finch, ils présentent pas mal de partenaires. Mais pour beaucoup, je pense qu'en France, c'est surtout de l'affichage : ils ne les utilisent pas encore réellement, ou alors ils testent à la rigueur, comme nous. Nous avons été leur premier partenariat en France, donc je pense que nous sommes ceux qui l'utilisons le plus, simplement parce que ça fait plus longtemps. Et je pense à Wilmotte, par exemple, qui en a parlé dans leur communication partenaire. On en a discuté l'autre jour parce que j'ai un projet avec eux, et il s'avère qu'ils l'utilisaient. Ils ont dit qu'ils avaient un compte, je crois. Je pense qu'ils sont abonnés, mais ils n'ont utilisé que deux ou trois fois et c'est tout. Ils se sont confrontés aux mêmes difficultés que nous au début : il faut se lancer. Et pourtant, après deux ans, nous restons encore en avance. Il y a une inertie en architecture : le projet prime toujours. Quand en plus il faut apprendre un nouvel outil, la priorité reste de livrer le chantier, et on verra le reste après. Tout prend donc du temps. S'ils l'utilisent réellement ? Je ne sais pas. Franchement, je me demande si nous ne sommes pas les seuls en France.

[Thibaud Bronchart]

Les bureaux français sont très freinés par le fait qu'ils travaillent uniquement sur Archicad à partir de maintenant, donc c'est un vrai frein. Je pense que beaucoup se disent : « Puisque vous n'avez pas Archicad, pourquoi viendrions-nous ? » Et, en fait, c'est aussi une question de coût : si ça ne fonctionne pas pourquoi utiliser l'IA

[Karina Pak]

Moi, j'ai l'impression que ce que Finch ne répond pas forcément aux besoins liés à ton travail de fin d'études. Par exemple, pour la lumière, Finch propose aujourd'hui une fonctionnalité dans ce sens, mais elle n'est pas réellement adaptée au calcul précis de l'éclairage.

[Thibaud Bronchart]

Ce n'est pas le plus optimal là-dessus, je pense. Je ne le saurais pas, d'ailleurs.

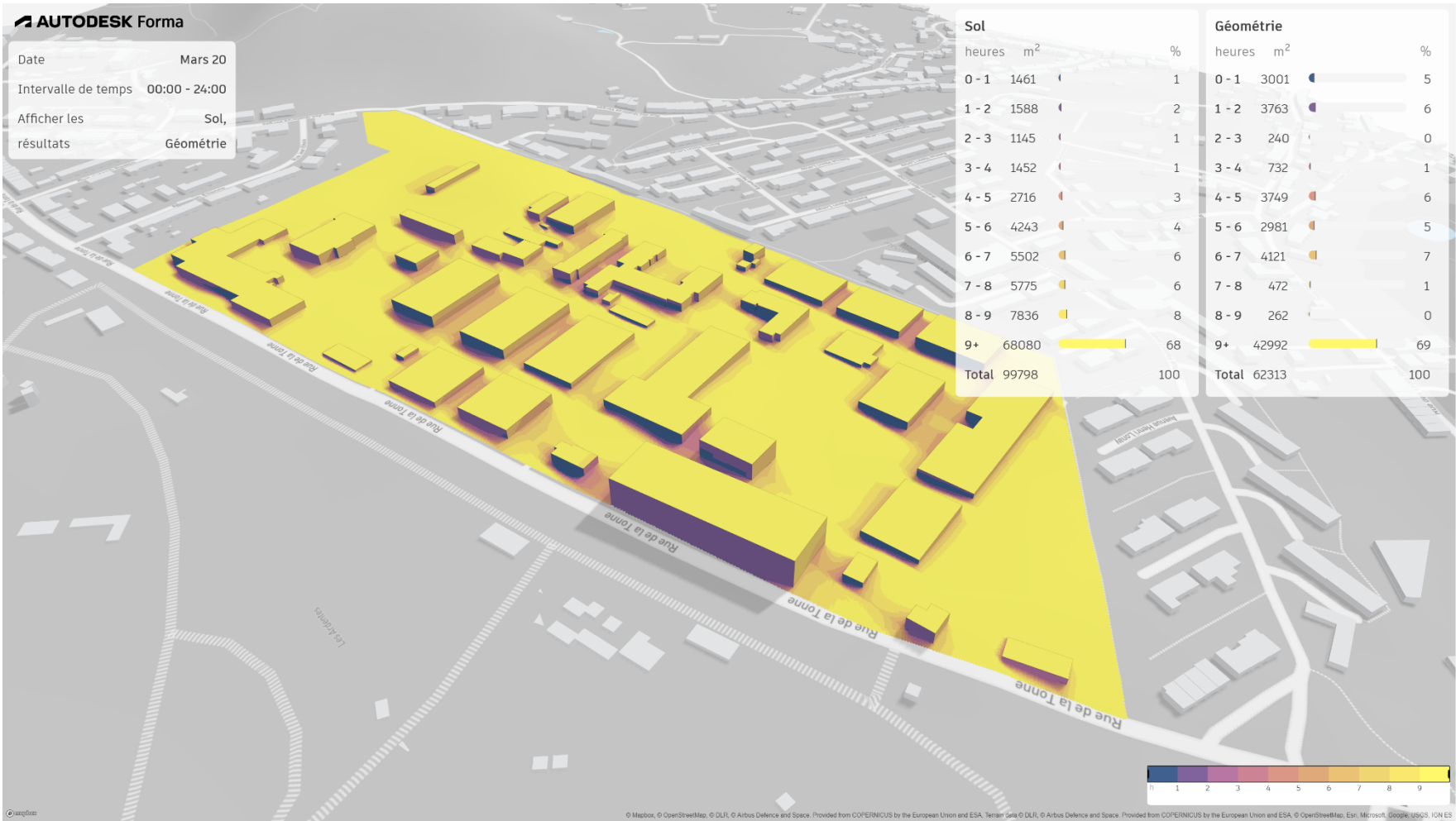
Maintenant, le seul que je vois dans ma tête qui, visuellement, parle de ça, c'est Forma. Avec ses analyses urbaines, l'ombre de l'arbre, l'échauffement, l'albedo, etc. C'est le seul que je vois comme ça. Finch travaille surtout à l'intérieur du bâtiment, avec une approche qui prend en compte le soleil à l'intérieur, ce qui m'intéresse. Pour l'analyse des typologies de loggia, j'aimerais aller au-delà de nos simples coupes : on suppose actuellement que le soleil vient d'une certaine direction, et ça fonctionne, mais ce serait vraiment intéressant d'avoir une véritable analyse.

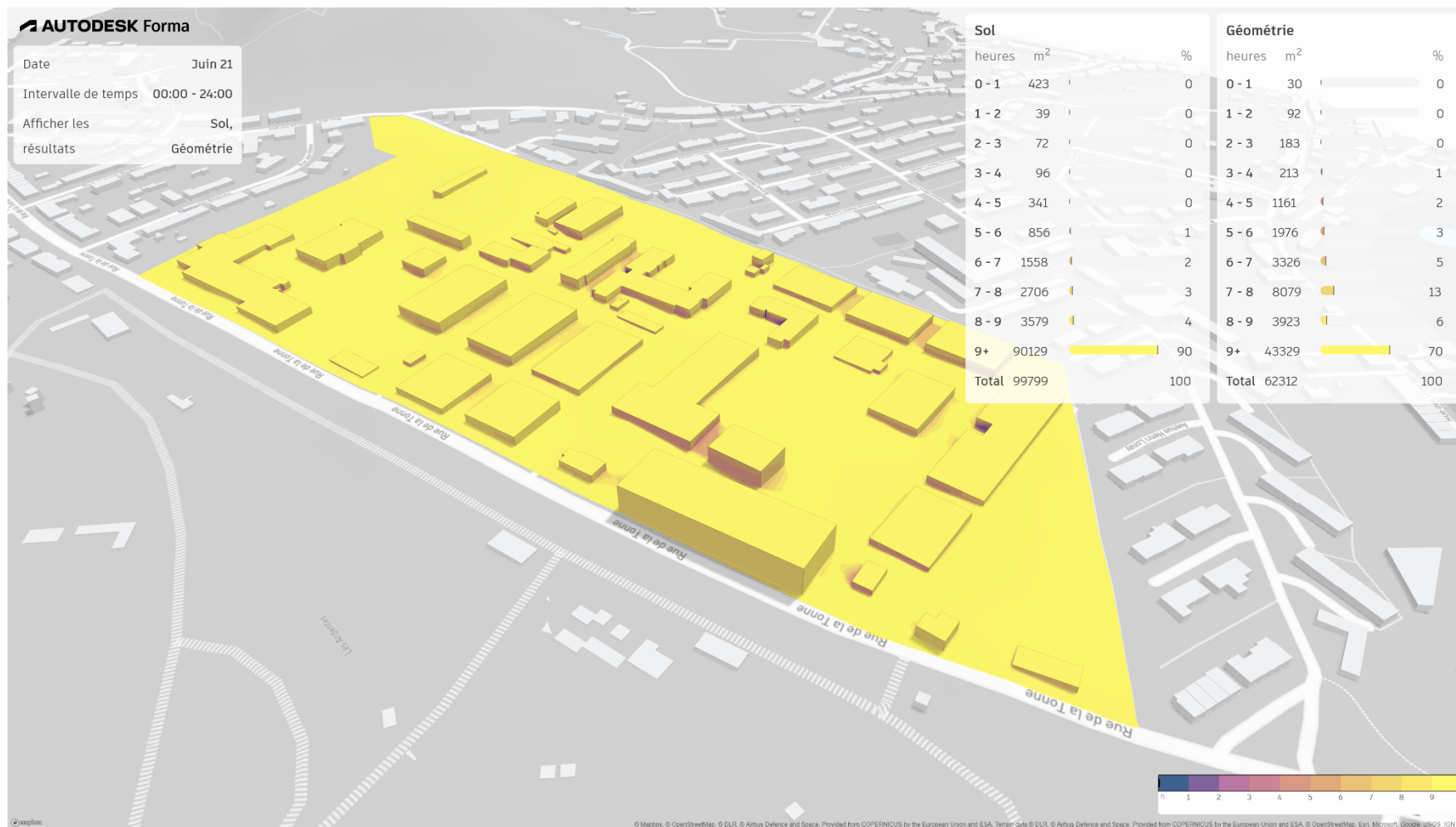
[Karina Pak]

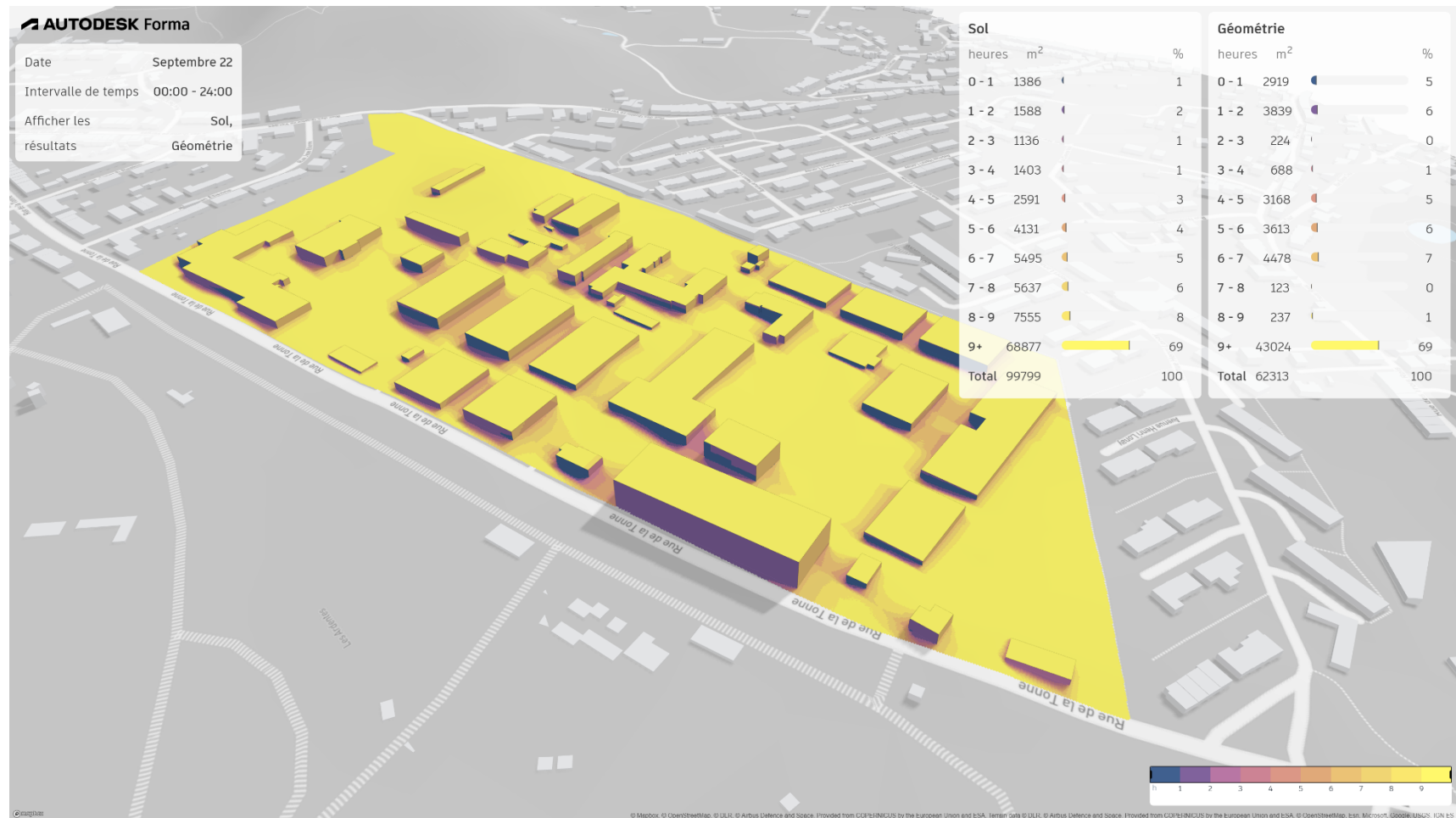
C'est quelque chose de spatial. Quand on modélise le volume avec le soleil, la question principale est de savoir, si on ne fournit pas la localisation exacte, à partir de quel point il calcule. Visuellement, on voit que certaines parties sont plus foncées, donc qu'elles reçoivent moins de lumière. Mais lorsque l'on examine les zones profondes du bâtiment, on sait déjà que ce n'est pas idéal. Visuellement, en revanche, cela permet de créer le volume et d'obtenir rapidement un schéma qui montre les endroits où le soleil manque.

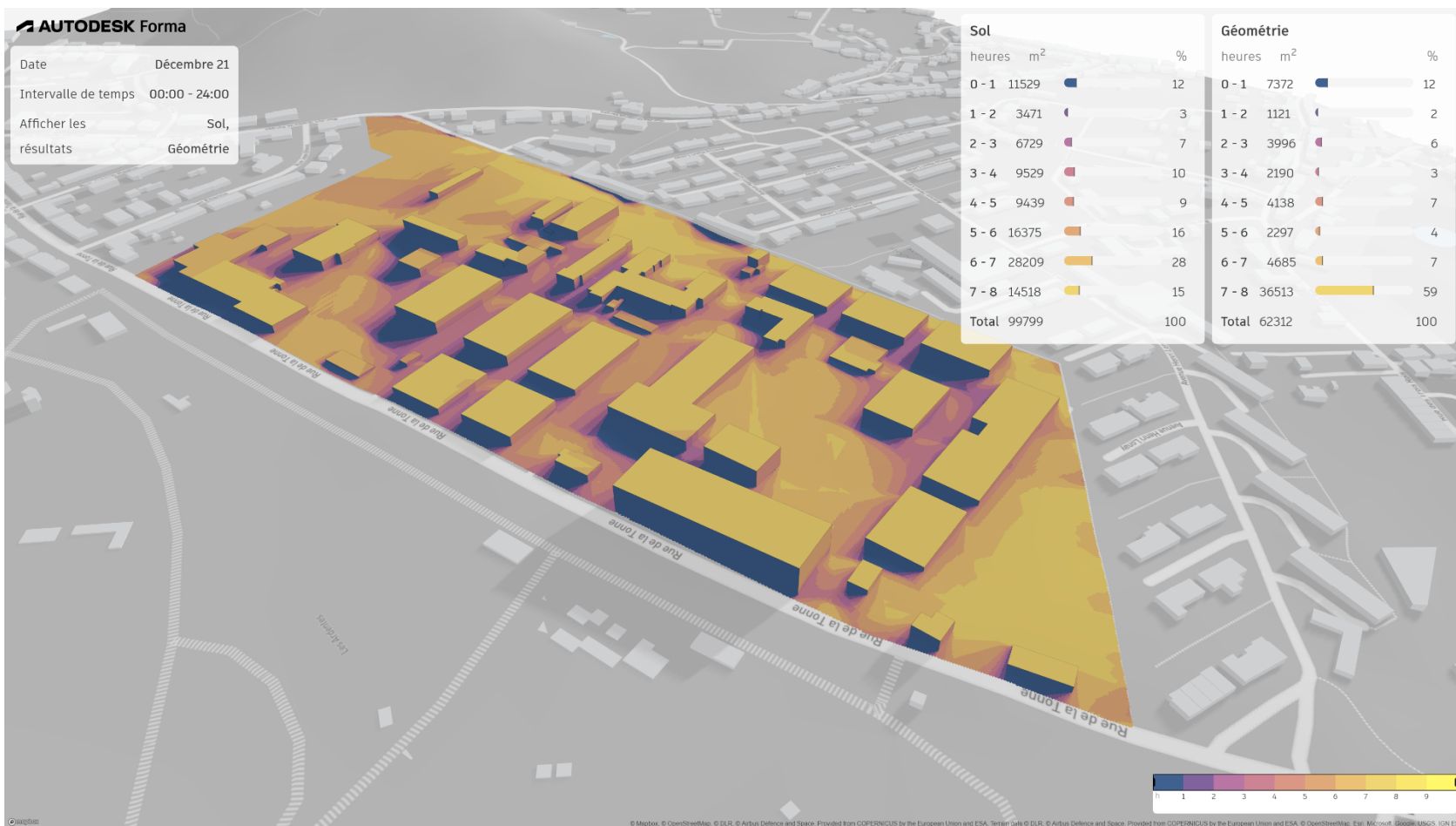
ANNEXE 3 : ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

- Analyse des heures d'ensoleillement

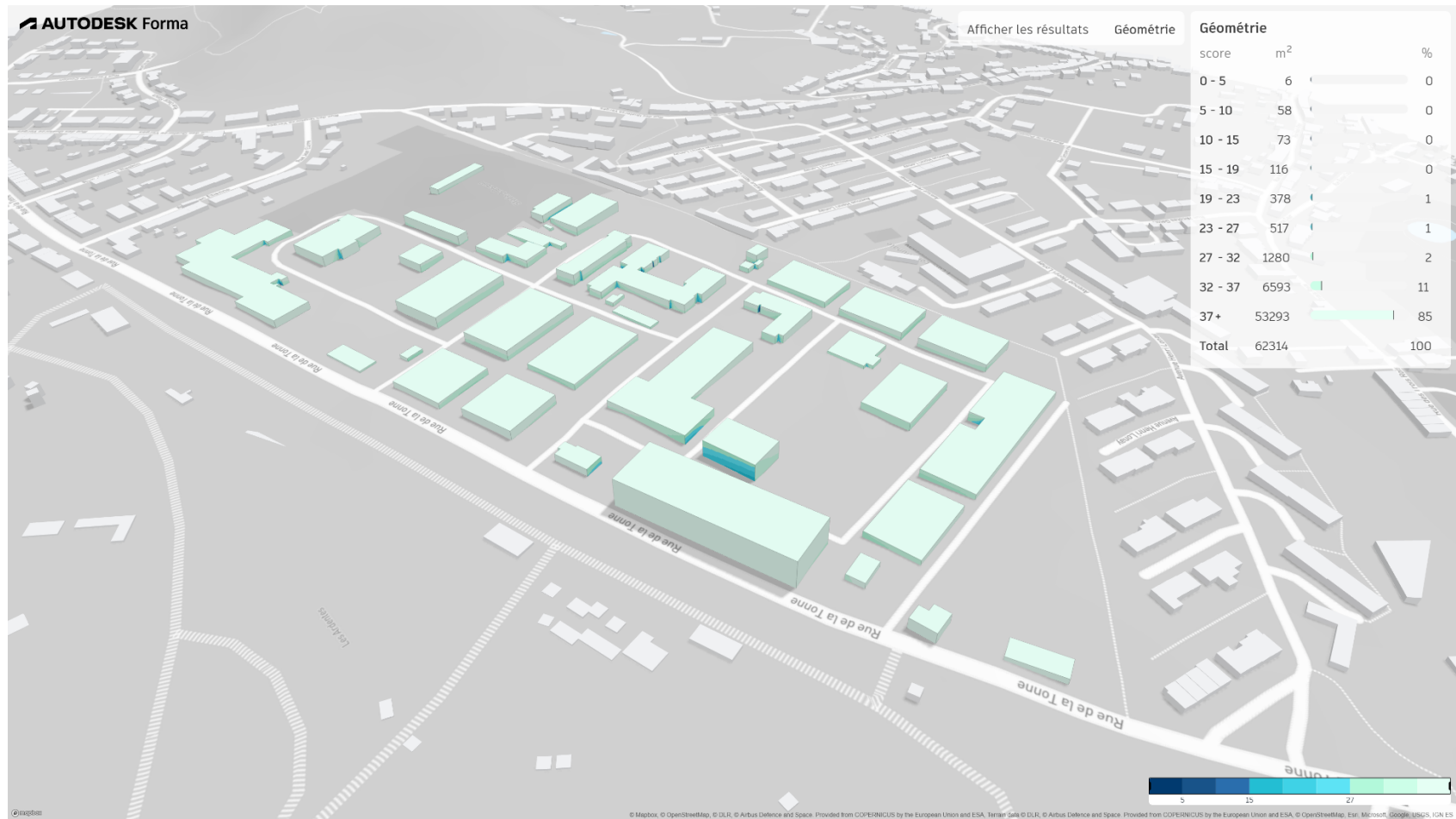








- Evaluation du potentiel de lumière naturelle



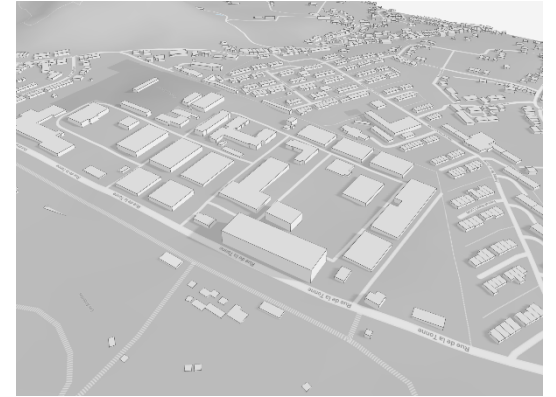
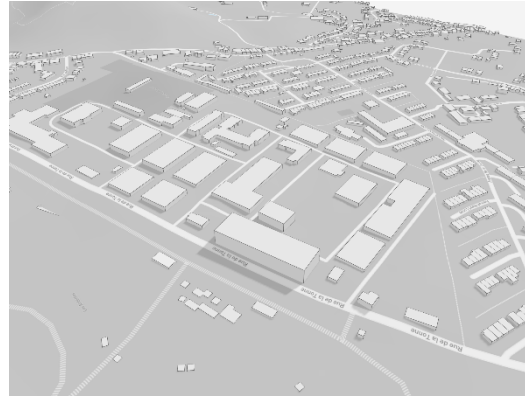
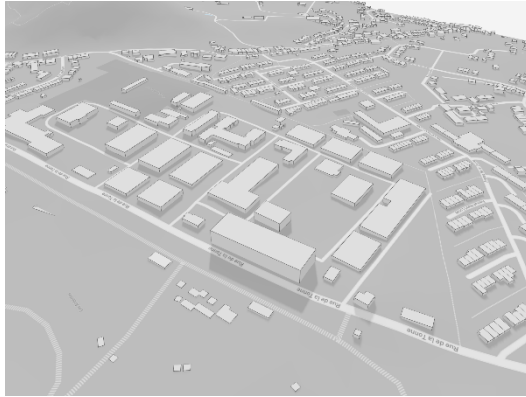
- Etude d'ombrage

10h

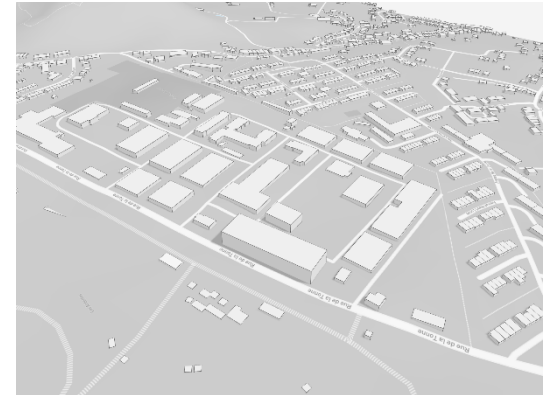
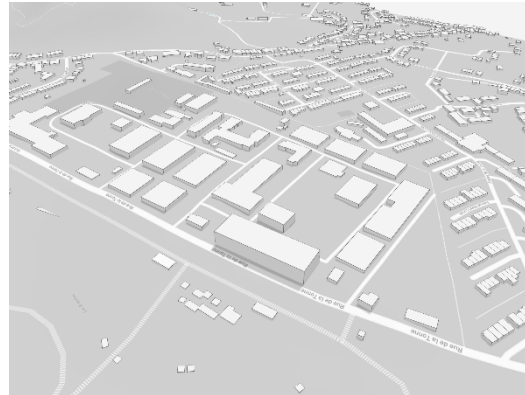
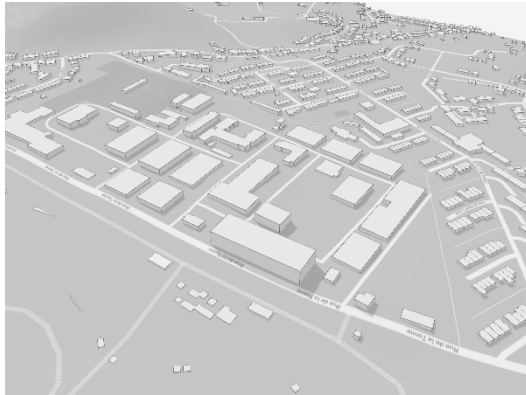
13h

16h

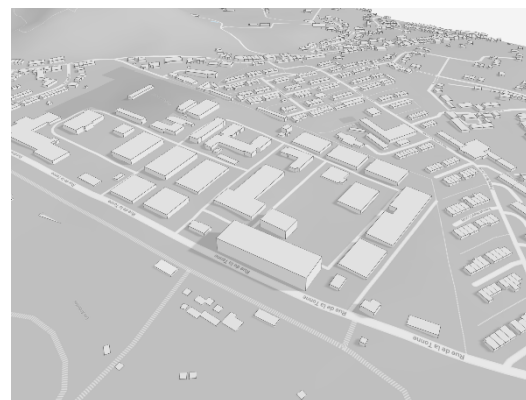
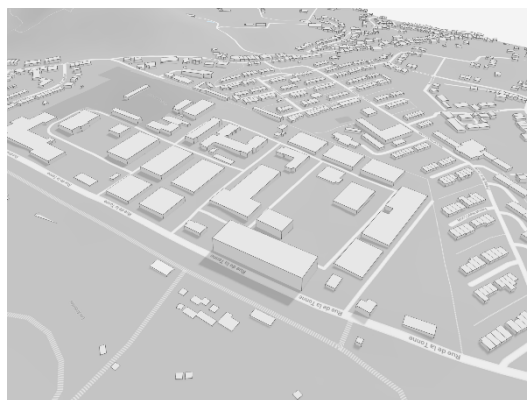
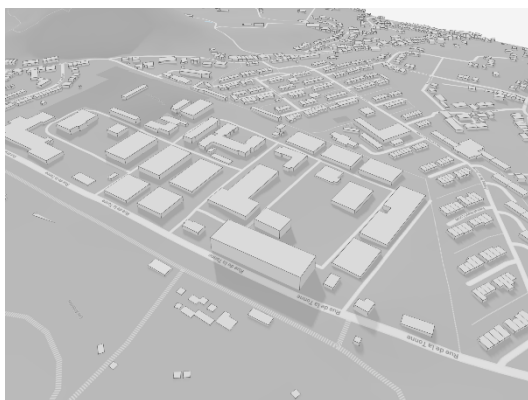
Équinoxe de printemps (20 mars 2026)



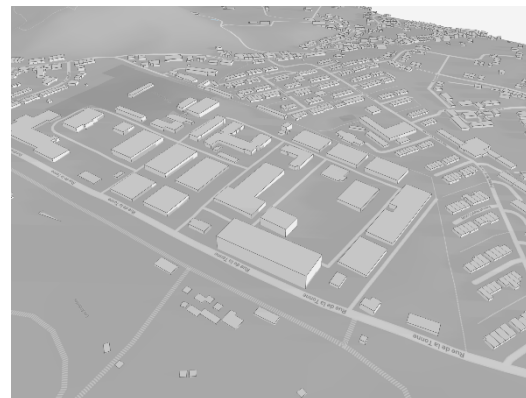
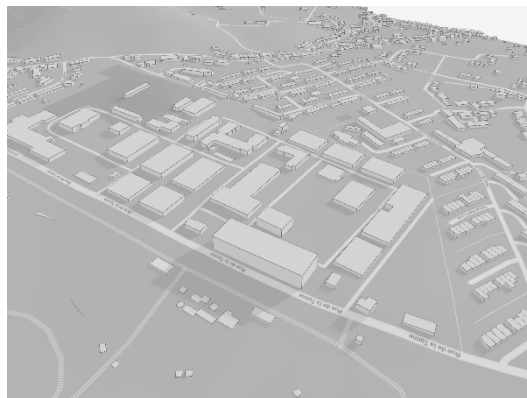
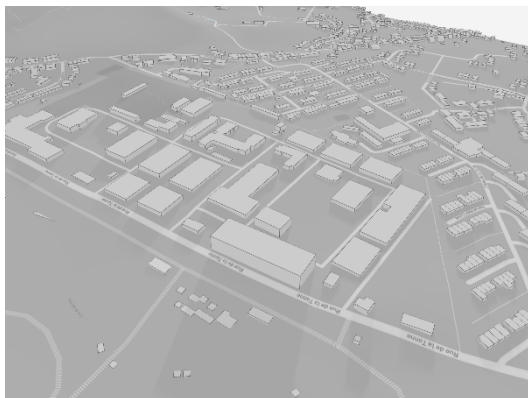
Solstice d'été (21 juin 2026)



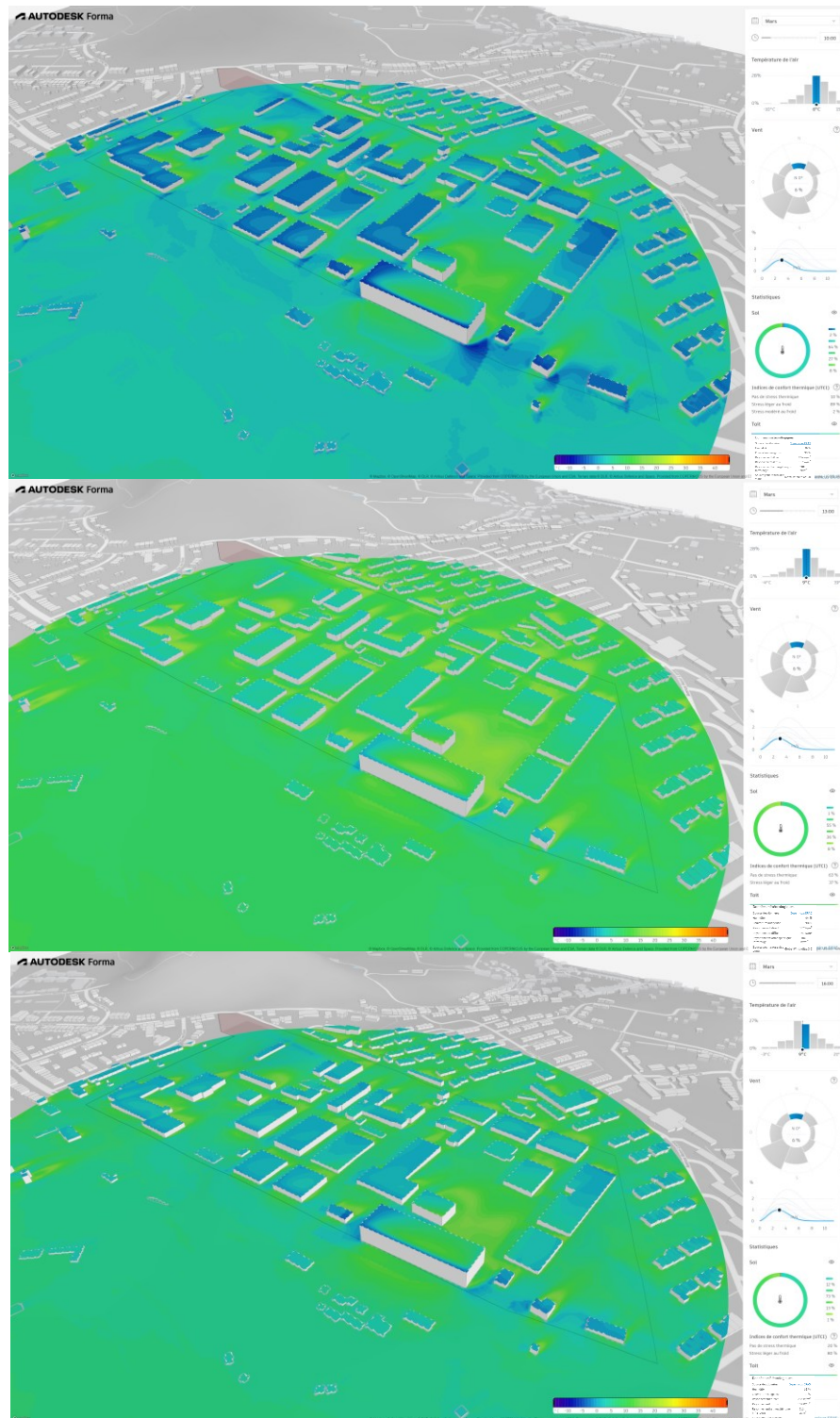
Équinoxe d'automne (22
septembre 2026)

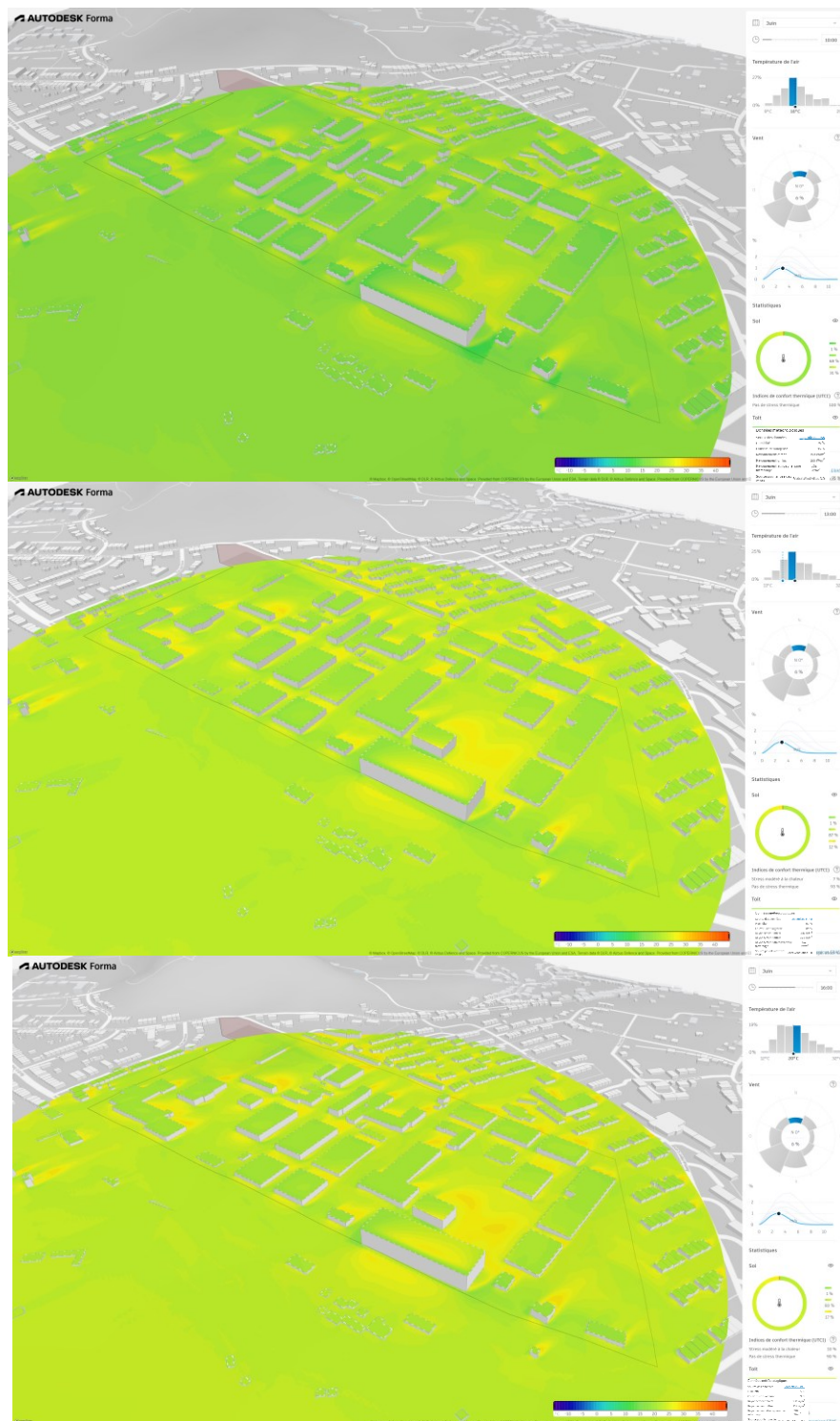


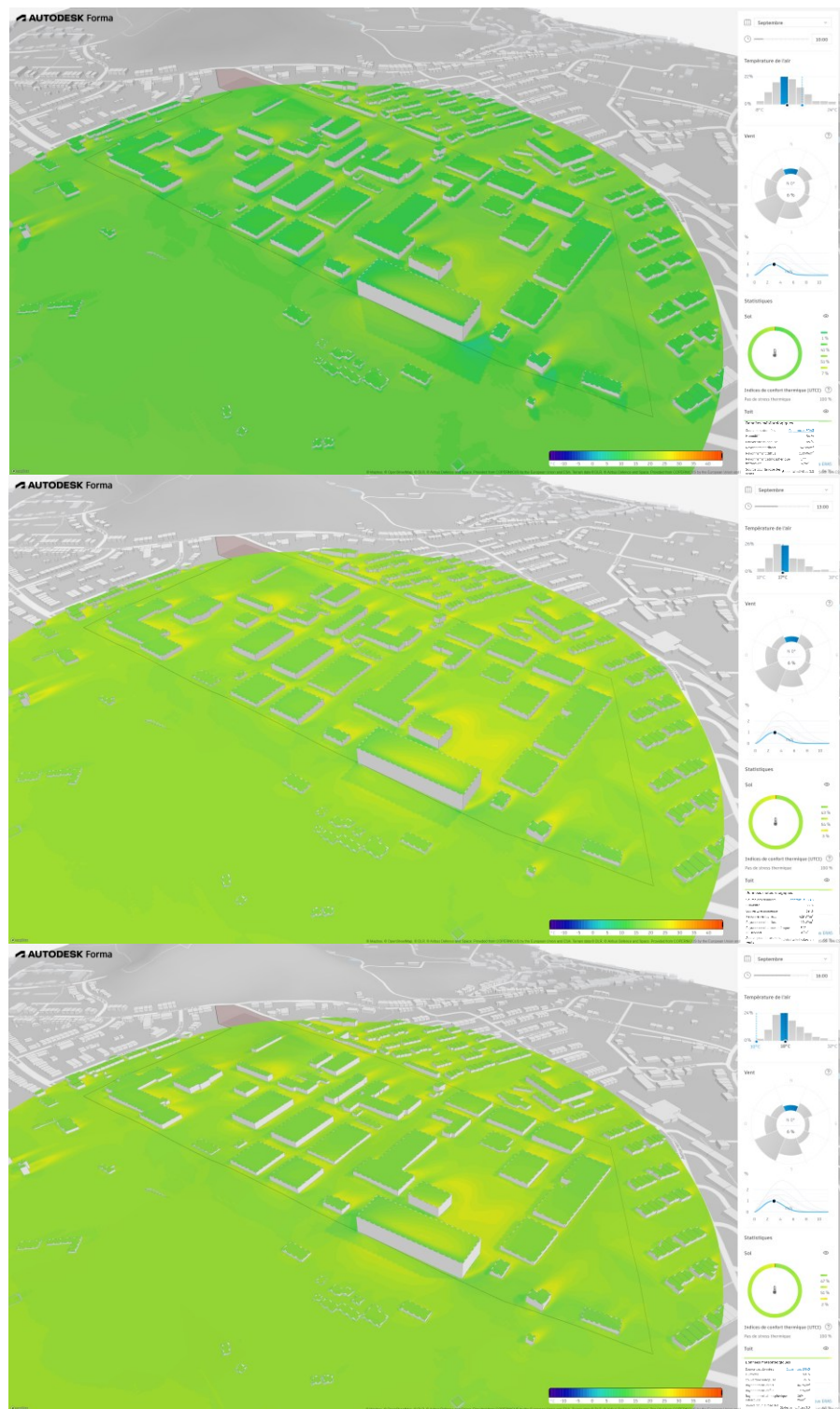
Solstice d'hiver (21 décembre
2026)

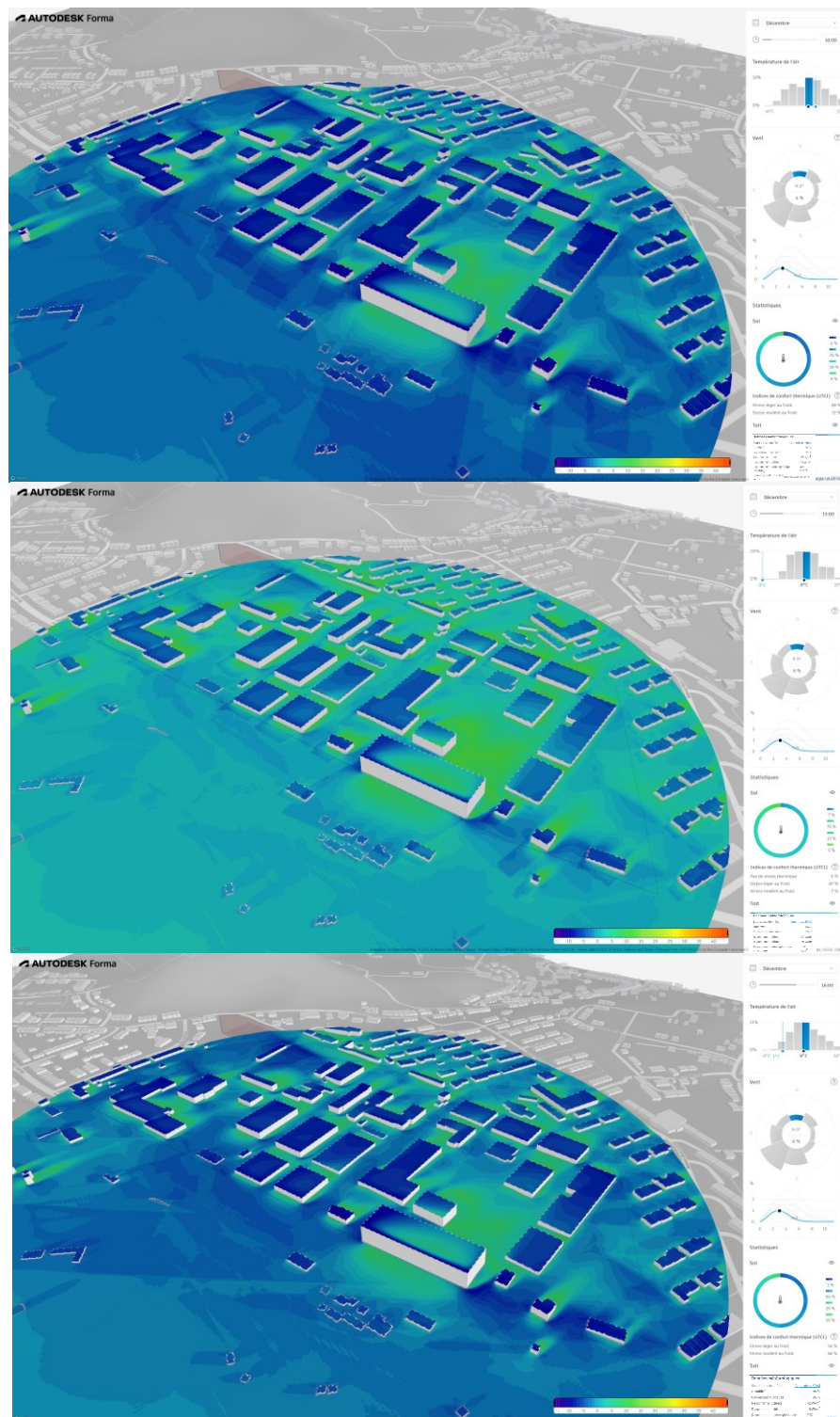


- Analyse du microclimat

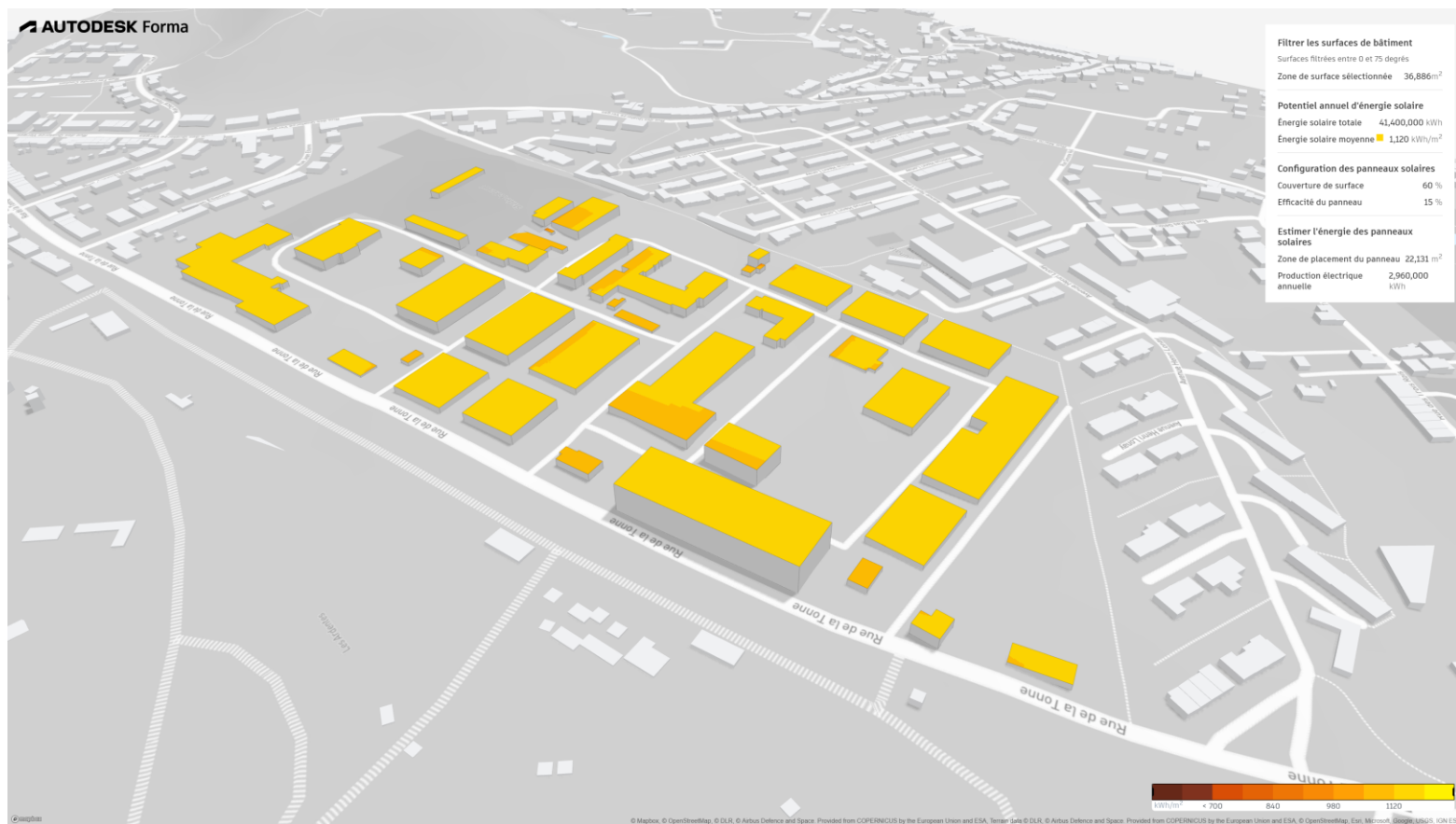








- Analyse de l'énergie solaire



ANNEXE 4 : CORPUS DES 9 VARIANTES

VARIANTE 1



Statistics	
French	
Building	Site Space Element Parking Terrain
SDP	4 233 m²
SUB	3 890 m²
SUN	3 343 m²
Efficiency spatiale	78 %
Volume	13 586 m³
Emprise au sol	886 m²
Surface de toiture	886 m²
Bâtiments	1



Hiver (21 décembre)

Mi-saison (20 mars-22 septembre)

Été (21 juin)

Annuel

Heures d'ensoleillement

Pourcentage de surfaces ensoleillées au moins 8 heures



Bâtiment : 60% (8h+) Sol : 69% (8h+)

Bâtiment : 74% (8h+) Sol : 91% (8h+)

Bâtiment : 77% (8h+) Sol : 94% (8h+)

Bâtiment : 71% (8h+) Sol : 89% (8h+)

Hiver

Mi-saison

Été

Annuel

Rayonnement solaire

Éclairement moyen de chaque saison et cumul annuel



Bâtiment : 27kWh/m² Sol : 31kWh/m²

Bâtiment : 169kWh/m² Sol : 237kWh/m²

Bâtiment : 278kWh/m² Sol : 433kWh/m²

Bâtiment : 663kWh/m² Sol : 966kWh/m²

Visibilité du ciel

Angle 45° obstrué

Potentiel de lumière du jour

Pourcentage de surfaces bénéficiant d'au moins 27% d'éclairement du ciel et pourcentage de surfaces présentant un angle obstrué à 45°



Bâtiment : 94% Sol : 100%

Bâtiment : 0%

Interprétation de la variante : La variante présente un ensoleillement élevé (≈60–77 % des surfaces bâties ≥ 8 h ; 69–94 % au sol) et un rayonnement solaire annuel important (≈663 kWh/m² pour le bâtiment ; ≈966 kWh/m² pour le sol), associé à un potentiel de lumière du jour élevé (≈94–100 %) et une absence d'obstruction significative.

VARIANTE 2



Hiver (21 décembre)

Mi-saison (20 mars-22 septembre)

Été (21 juin)

Annuel

Heures d'ensoleillement

Pourcentage de surfaces ensoleillées au moins 8 heures



Bâtiment : 90% (8h+) Sol : 36% (8h+)

Bâtiment : 91% (8h+) Sol : 90% (8h+)

Bâtiment : 91% (8h+) Sol : 94% (8h+)

Bâtiment : 91% (8h+) Sol : 87% (8h+)

Hiver

Mi-saison

Été

Annuel

Rayonnement solaire

Éclairement moyen de chaque saison et cumul annuel



Bâtiment : 30kWh/m² Sol : 30kWh/m²

Bâtiment : 205kWh/m² Sol : 238kWh/m²

Bâtiment : 354kWh/m² Sol : 442kWh/m²

Bâtiment : 819kWh/m² Sol : 975kWh/m²

Visibilité du ciel

Angle 45° obstrué

Potentiel de lumière du jour

Pourcentage de surfaces bénéficiant d'au moins 27% d'éclairement du ciel et pourcentage de surfaces présentant un angle obstrué à 45°



Bâtiment : 95% Sol : 100%

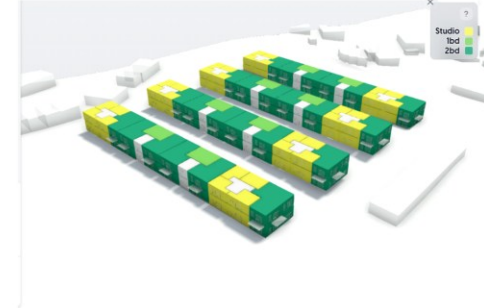
Bâtiment : 1%

Interprétation de la variante : La variante se caractérise par un très fort ensoleillement du bâtiment ($\approx 90-91\% \geq 8\text{ h}$) et un rayonnement solaire annuel élevé ($\approx 819\text{ kWh/m}^2$), avec un potentiel de lumière du jour proche de 95-100 % et une obstruction quasi nulle.

VARIANTE 3



Statistics	
French	
Building	Site Space Element Parking Terrain
SDP	7 442 m²
SUB	6 860 m²
SUN	5 868 m²
Efficiency spatiale	79 %
Volume	26 048 m³
Emprise au sol	3 721 m²
Surface de toiture	3 721 m²
Bâtiments	4



Hiver (21 décembre)

Mi-saison (20 mars-22 septembre)

Été (21 juin)

Annuel

Heures d'ensoleillement

Pourcentage de surfaces ensoleillées au moins 8 heures



Bâtiment : 85% (8h+) Sol : 6% (8h+)

Hiver



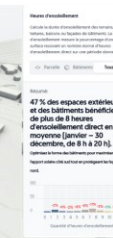
Bâtiment : 90% (8h+) Sol : 40% (8h+)

Mi-saison



Bâtiment : 90% (8h+) Sol : 78% (8h+)

Été



Bâtiment : 89% (8h+) Sol : 12% (8h+)

Annuel

Rayonnement solaire

Éclairement moyen de chaque saison et cumul annuel



Bâtiment : 30kWh/m² Sol : 14kWh/m²

Visibilité du ciel



Bâtiment : 188kWh/m² Sol : 160kWh/m²

Angle 45° obstrué



Bâtiment : 305kWh/m² Sol : 335kWh/m²

Été



Bâtiment : 737kWh/m² Sol : 683kWh/m²

Annuel

Potentiel de lumière du jour

Pourcentage de surfaces bénéficiant d'au moins 27% d'éclairement du ciel et pourcentage de surfaces présentant un angle obstrué à 45°



Bâtiment : 97% Sol : 100%



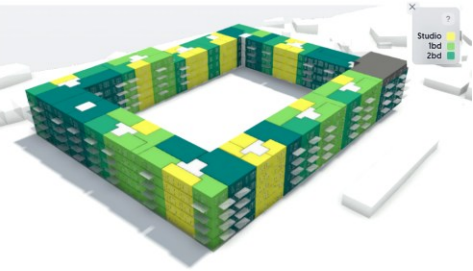
Bâtiment : 1%

Interprétation de la variante : La variante montre un ensoleillement important du bâtiment (≈85–90 % ≥ 8 h), tandis que le sol reste faiblement ensoleillé (≈6–40 %), avec un rayonnement annuel plus limité (≈737 kWh/m² bâtiment ; ≈683 kWh/m² sol) malgré un bon potentiel de lumière du jour (≈97–100 %).

VARIANTE 4



Statistics	
Building Site Space Element Parking Terrain	
SDP	19 111 m²
SUB	20 098 m²
SUN	17 740 m²
Efficiency spatiale	89 %
Volume	61 425 m³
Emprise au sol	4 092 m²
Surface de toiture	4 092 m²
Bâtiments	1



Hiver (21 décembre)

Mi-saison (20 mars-22 septembre)

Eté (21 juin)

Annuel

Heures d'ensoleillement

Pourcentage de surfaces ensoleillées au moins 8 heures



Bâtiment : 83% (8h+) Sol : 14% (8h+)

Bâtiment : 94% (8h+) Sol : 12% (8h+)

Bâtiment : 95% (8h+) Sol : 50% (8h+)

Bâtiment : 92% (8h+) Sol : 22% (8h+)

Hiver

Mi-saison

Eté

Annuel

Rayonnement solaire

Éclairement moyen de chaque saison et cumul annuel



Bâtiment : 31kWh/m² Sol : 20kWh/m²

Bâtiment : 220kWh/m² Sol : 140kWh/m²

Bâtiment : 386kWh/m² Sol : 356kWh/m²

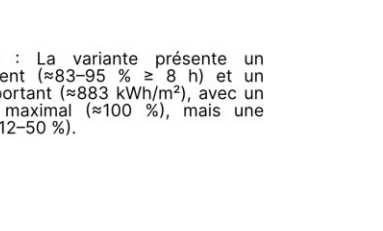
Bâtiment : 883kWh/m² Sol : 667kWh/m²

Visibilité du ciel

Angle 45° obstrué

Potentiel de lumière du jour

Pourcentage de surfaces bénéficiant d'au moins 27% d'éclairement du ciel et pourcentage de surfaces présentant un angle obstrué à 45°



Bâtiment : 100% Sol : 100%

Bâtiment : 0%

Interprétation de la variante : La variante présente un ensoleillement élevé du bâtiment (≈83-95 % ≥ 8 h) et un rayonnement solaire annuel important (≈883 kWh/m²), avec un potentiel de lumière du jour maximal (≈100 %), mais une exposition du sol plus réduite (≈12-50 %).

VARIANTE 5



Statistics	
French	
Building	Site Space Element Parking Terrain
SDP	18 599 m²
SUB	17 249 m²
SUN	15 124 m²
Efficiency spatiale	81 %
Volume	58 453 m³
Emprise au sol	2 657 m²
Surface de toiture	2 657 m²
Bâtiments	3



Hiver (21 décembre)

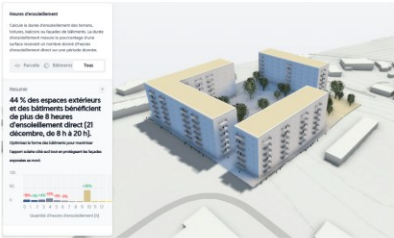
Mi-saison (20 mars-22 septembre)

Eté (21 juin)

Annuel

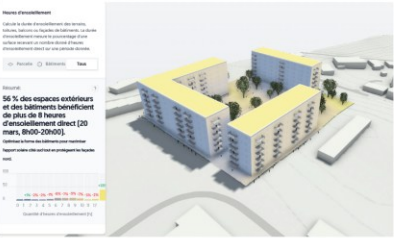
Heures d'ensoleillement

Pourcentage de surfaces ensoleillées au moins 8 heures



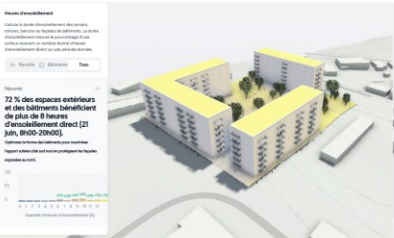
Bâtiment : 79% (8h+) Sol : 10% (8h+)

Hiver



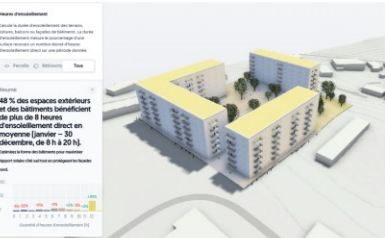
Bâtiment : 81% (8h+) Sol : 33% (8h+)

Mi-saison



Bâtiment : 82% (8h+) Sol : 64% (8h+)

Eté



Bâtiment : 80% (8h+) Sol : 18% (8h+)

Annuel

Rayonnement solaire

Éclairement moyen de chaque saison et cumul annuel



Bâtiment : 27kWh/m² Sol : 19kWh/m²

Visibilité du ciel



Bâtiment : 173kWh/m² Sol : 165kWh/m²

Angle 45° obstrué



Bâtiment : 285kWh/m² Sol : 320kWh/m²



Bâtiment : 681kWh/m² Sol : 686kWh/m²

Potentiel de lumière du jour



Bâtiment : 86% Sol : 96%



Bâtiment : 4%

Interprétation de la variante : La variante affiche des niveaux d'ensoleillement modérés (≈79-82 % bâtiment ; ≈10-64 % sol) et un rayonnement annuel intermédiaire (≈681 kWh/m² bâtiment ; ≈686 kWh/m² sol), avec un potentiel de lumière du jour compris entre ≈86 % et 96 % et une légère obstruction (≈4 %).

VARIANTE 6



Statistics	
	French
Building	Site
SDP	18 379 m²
SUB	17 010 m²
SUN	14 858 m²
Efficiency spatiale	80 %
Volume	57 795 m³
Emprise au sol	2 657 m²
Surface de toiture	2 657 m²
Bâtiments	4



Hiver (21 décembre)

Mi-saison (20 mars-22 septembre)

Été (21 juin)

Annuel

Heures d'ensoleillement

Pourcentage de surfaces ensoleillées au moins 8 heures



Bâtiment : 66% (8h+) Sol : 5% (8h+)

Hiver



Bâtiment : 73% (8h+) Sol : 9% (8h+)

Mi-saison



Bâtiment : 73% (8h+) Sol : 54% (8h+)

Été



Bâtiment : 71% (8h+) Sol : 5% (8h+)

Annuel

Rayonnement solaire

Éclairement moyen de chaque saison et cumul annuel



Bâtiment : 26kWh/m² Sol : 18kWh/m²

Visibilité du ciel



Bâtiment : 166kWh/m² Sol : 153kWh/m²

Angle 45° obstrué



Bâtiment : 274kWh/m² Sol : 301kWh/m²



Bâtiment : 651kWh/m² Sol : 642kWh/m²

Potentiel de lumière du jour

Pourcentage de surfaces bénéficiant d'au moins 27% d'éclairement du ciel et pourcentage de surfaces présentant un angle obstrué à 45°



Bâtiment : 90% Sol : 98%



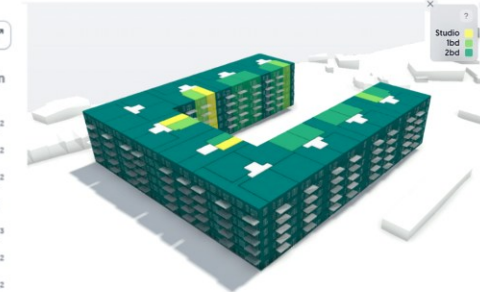
Bâtiment : 2%

Interprétation de la variante : La variante se distingue par un ensoleillement plus limité (≈66-73 % bâtiment ; ≈5-54 % sol) et un rayonnement annuel plus faible (≈651 kWh/m² bâtiment ; ≈642 kWh/m² sol), avec un potentiel de lumière du jour de ≈90-98 % et une faible obstruction (≈2 %).

VARIANTE 7



Statistics	
French	
Building	Site Space Element Parking Terrain
SDP	26 569 m²
SUB	25 465 m²
SUN	22 923 m²
Efficience spatiale	86 %
Volume	84 136 m³
Emprise au sol	4 428 m²
Surface de toiture	4 428 m²
Bâtiments	1



Hiver (21 décembre)

Mi-saison (20 mars-22 septembre)

Été (21 juin)

Annuel

Heures d'ensoleillement

Pourcentage de surfaces ensoleillées au moins 8 heures



Bâtiment : 88% (8h+) Sol : 29% (8h+)



Bâtiment : 88% (8h+) Sol : 38% (8h+)



Bâtiment : 88% (8h+) Sol : 40% (8h+)



Bâtiment : 88% (8h+) Sol : 36% (8h+)

Hiver

Mi-saison

Été

Annuel

Rayonnement solaire

Éclairement moyen de chaque saison et cumul annuel



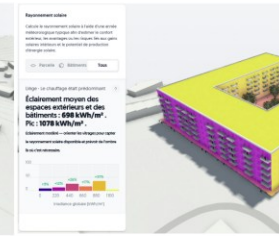
Bâtiment : 28kWh/m² Sol : 20kWh/m²



Bâtiment : 191kWh/m² Sol : 164kWh/m²



Bâtiment : 328kWh/m² Sol : 301kWh/m²



Bâtiment : 763kWh/m² Sol : 669kWh/m²

Visibilité du ciel

Angle 45° obstrué

Potentiel de lumière du jour

Pourcentage de surfaces bénéficiant d'au moins 27% d'éclairement du ciel et pourcentage de surfaces présentant un angle obstrué à 45°



Bâtiment : 88% Sol : 91%



Bâtiment : 1%

Interprétation de la variante : La variante présente un ensoleillement élevé du bâtiment ($\approx 88\% \geq 8\text{ h}$) et un rayonnement annuel conséquent ($\approx 763\text{ kWh/m}^2$), associé à un potentiel de lumière du jour de $\approx 88-91\%$, tandis que le sol reste modérément ensoleillé ($\approx 29-40\%$).

VARIANTE 8



Statistics	
French	
Building	Site Space Element Parking Terrain
SDP	37 187 m²
SUB	35 132 m²
SUN	31 323 m²
Efficience spatiale	84 %
Volume	116k m³
Emprise au sol	4 540 m²
Surface de toiture	4 540 m²
Bâtiments	3



Hiver (21 décembre)

Mi-saison (20 mars-22 septembre)

Été (21 juin)

Annuel

Heures d'ensoleillement

Pourcentage de surfaces ensoleillées au moins 8 heures



Bâtiment : 73% (8h+) Sol : 2% (8h+)

Bâtiment : 76% (8h+) Sol : 4% (8h+)

Bâtiment : 76 (8h+) Sol : 17% (8h+)

Bâtiment : 76% (8h+) Sol : 4% (8h+)

Hiver

Mi-saison

Été

Annuel

Rayonnement solaire

Éclairement moyen de chaque saison et cumul annuel



Bâtiment : 25/m² Sol : 9kWh/m²

Bâtiment : 164kWh/m² Sol : 94kWh/m²

Bâtiment : 274kWh/m² Sol : 210kWh/m²

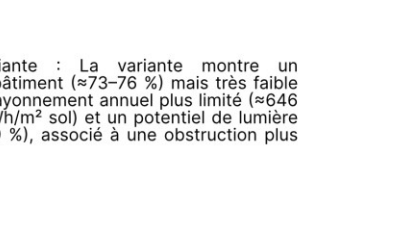
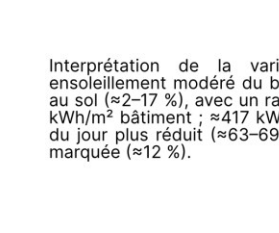
Bâtiment : 646kWh/m² Sol : 417kWh/m²

Visibilité du ciel

Angle 45° obstrué

Potentiel de lumière du jour

Pourcentage de surfaces bénéficiant d'au moins 27% d'éclairement du ciel et pourcentage de surfaces présentant un angle obstrué à 45°



Bâtiment : 69% Sol : 63%

Bâtiment : 12%

Interprétation de la variante : La variante montre un ensoleillement modéré du bâtiment (≈73-76 %) mais très faible au sol (≈2-17 %), avec un rayonnement annuel plus limité (≈646 kWh/m² bâtiment ; ≈417 kWh/m² sol) et un potentiel de lumière du jour plus réduit (≈63-69 %), associé à une obstruction plus marquée (≈12 %).

VARIANTE 9



Statistics	
Building	Site Space Element Parking Terrain
SDP	26 284 m²
SUB	24 185 m²
SUN	21 389 m²
Efficience spatiale	79 %
Volume	81 066 m³
Emprise au sol	2 214 m²
Surface de toiture	2 214 m²
Bâtiments	3



Hiver (21 décembre)

Mi-saison (20 mars-22 septembre)

Été (21 juin)

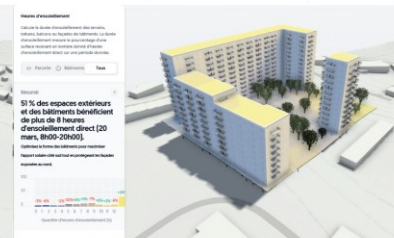
Annuel

Heures d'ensoleillement

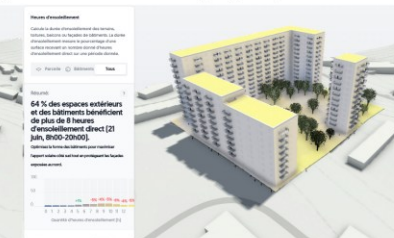
Pourcentage de surfaces ensoleillées au moins 8 heures



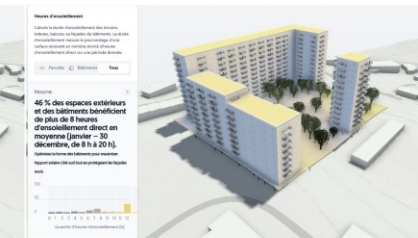
Bâtiment : 57% (8h+) Sol : 21% (8h+)



Bâtiment : 71% (8h+) Sol : 33% (8h+)



Bâtiment : 71% (8h+) Sol : 57% (8h+)



Bâtiment : 70% (8h+) Sol : 24% (8h+)

Hiver

Mi-saison

Été

Annuel

Rayonnement solaire

Éclairement moyen de chaque saison et cumul annuel



Bâtiment : 25kWh/m² Sol : 21kWh/m²



Bâtiment : 158kWh/m² Sol : 170kWh/m²



Bâtiment : 255kWh/m² Sol : 318kWh/m²



Bâtiment : 617kWh/m² Sol : 699kWh/m²

Visibilité du ciel

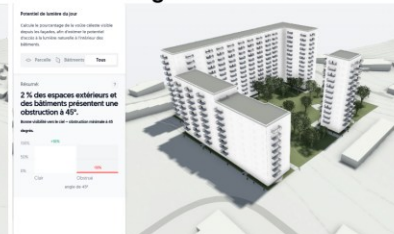
Angle 45° obstrué

Potentiel de lumière du jour

Pourcentage de surfaces bénéficiant d'au moins 27% d'éclairement du ciel et pourcentage de surfaces présentant un angle obstrué à 45°



Bâtiment : 82% Sol : 95%



Bâtiment : 2%

Interprétation de la variante : La variante présente des niveaux d'ensoleillement intermédiaires (≈57-71 % bâtiment ; ≈21-57 % sol) et un rayonnement annuel modéré (≈617 kWh/m² bâtiment ; ≈699 kWh/m² sol), avec un potentiel de lumière du jour de ≈82-95 % et une faible obstruction (≈2 %).