



## Thème :

*L'apport de l'intelligence artificielle dans la conception d'une architecture bioclimatique et durable*

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master II en Architecture

« Spécialité : Architecture »

« Coloration : Architecture,

Environnement et technologie »

Préparé par :

**MANSOURI Islam**

<b>Dr BELHOCINE Ouahiba</b>	<b>Département architecture de Bejaia</b>	<b>Président de jury</b>
<b>Dr BOUMEZOUED Sara</b>	<b>Département architecture de Bejaia</b>	<b>Examinateuse</b>
<b>Dr DJERMOUNE Hocine</b>	<b>Département architecture de Bejaia</b>	<b>Promoteur</b>

Domaine : Architecture, Urbanisme et Métiers de la Ville

Filière : Architecture

Spécialité : Architecture

(Coloration : Architecture, environnement et technologie)

## Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du Diplôme de Master en architecture

### THEME

L'apport de l'intelligence artificielle dans la conception  
d'une architecture bioclimatique et durable



Présenté par :  
MANSOURI Islam

Encadré par :  
Dr DJERMOUNE  
Hocine

**Populaire et Démocratique Algérienne République**  
**وزارة التعليم العالي و البحث العلمي**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Déclaration sur l'honneur**

**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche**

*Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020  
Fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagia*

Je soussigné,

Nom : **MANSOURI**

Prénom : **Islam**

Matricule : **202033002667**

Spécialité et/ou Option : **Architecture, environnement et technologie**

Département : **Architecture**

Faculté : **Technologie**

Année universitaire **2024 / 2025**

Et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : **Master**

Intitulé : **L'apport de l'intelligence artificielle dans la conception d'une architecture bioclimatique et durable**

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,

Et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le  
**04 / 07 / 2025**

Signature de l'intéressé  
*Lu et approuvé*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciements

Avant d'entrer dans le vif du sujet, je tiens à remercier Dieu tout-puissant de nous avoir accordé la force, la détermination, la volonté et le courage nécessaires pour accomplir ce modeste travail.

Ensuite, je souhaite exprimer ma gratitude à M. DJERMOUNE Hocine, mon promoteur, qui a accepté d'encadrer ce mémoire et m'a accompagné tout au long de ce travail, tout en respectant mes convictions. Je n'oublie pas Mme LABRECHE Samia pour ses précieux conseils et son aide durant cette année en atelier.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'intérêt porté à notre recherche en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi qu'à l'ensemble du corps enseignant du département d'architecture de Béjaïa pour la qualité de leur pédagogie. Je pense notamment à Mme BOUANDAS Karima, qui m'a transmis les bases nécessaires et m'a fait aimer ce domaine Grâce à sa pédagogie rigoureuse, sa passion communicative et son soutien constant, elle m'a transmis bien plus que des connaissances techniques : elle a éveillé en moi une véritable fascination pour l'architecture.

Je remercie aussi tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, du primaire à l'université, et qui ont nourri ma soif de savoir, ainsi que ma famille, qui compte beaucoup pour moi, pour son soutien, ses encouragements et son affection.

Enfin, je n'oublie pas mes chers collègues, anciens comme actuels, pour leurs encouragements et leur soutien.

## Dédicace

« À mes chers parents, **Radia** et **Hafid**, pour votre amour, vos sacrifices et votre foi en moi.

À mes frères, **Hani** et **Halim**, pour votre soutien et votre complicité.

À mes amis, **Racim** et **Amin**, pour votre présence aux moments clés.

À celle qui m'a fait aimer l'architecture, mon enseignante Mme BOUANDAS Karima.

À mes professeurs de département d'architecture qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

À tous ceux qui sont chers, mes amies, mes collègues Et à ceux qui lisent ce mémoire avec intérêt »

## Résumé

Ce mémoire retrace l'évolution historique du processus de conception architecturale, depuis ses origines jusqu'à l'époque contemporaine. L'analyse met en lumière l'impact déterminant de la modularité, de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de l'Intelligence Artificielle (IA) dans la transformation des pratiques du domaine. L'émergence récente de l'IA générative apparaît comme l'aboutissement actuel de cette évolution, ouvrant à la fois de nouvelles perspectives et des défis inédits pour l'architecture moderne.

Il explore ensuite l'intelligence artificielle à travers ses origines, ses fondements théoriques et son rôle central dans les débats contemporains. Une définition précise du concept est proposée, accompagnée d'une analyse de ses applications majeures. L'étude souligne particulièrement l'importance stratégique de l'IA dans un contexte global où se croisent transformations technologiques accélérées et urgences environnementales.

L'étude aborde ensuite l'influence de l'IA sur la pratique architecturale, à travers une analyse des outils disponibles et de leurs applications spécifiques. Un focus particulier est porté sur son apport à l'architecture durable et bioclimatique, où les solutions algorithmiques offrent des réponses innovantes aux défis écologiques. La plateforme Autodesk Forma fait l'objet d'une analyse détaillée, révélant son potentiel pour la conception architecturale durable.

L'application concrète de ces technologies est démontrée par l'examen d'un projet réalisé avec Autodesk Forma. L'analyse couvre ses dimensions techniques, formelles et fonctionnelles, mettant en évidence les capacités d'optimisation de la plateforme pour répondre aux impératifs de durabilité.

Cette méthodologie est ensuite appliquée à un projet d'atelier : un centre communautaire. L'outil permet une analyse multifactorielle du site (vent, ensoleillement, acoustique) dont les résultats influent directement sur la proposition volumétrique. Cette démarche démontre comment l'IA peut transformer le processus de conception pour générer des solutions adaptées aux enjeux actuels du domaine architectural.

À travers ces étapes, ce mémoire a pour objectif de démontrer comment l'évolution technologique, notamment l'IA, transforme le domaine de l'architecture, tout en fournissant des outils efficaces pour relever les défis de durabilité et de performance dans la conception architecturale.

**Mots clés :** Conception architecturale, intelligence artificielle, durabilité, CAO, Autodesk Forma, modularité.

# Abstract

This memory traces the historical evolution of architectural design processes, from their origins to the contemporary era. The analysis highlights the decisive impact of modularity, Computer-Aided Design (CAD), and Artificial Intelligence (AI) in transforming the field's practices. The recent emergence of generative AI appears as the current culmination of this evolution, opening both new possibilities and unprecedented challenges for modern architecture.

The study then explores artificial intelligence through its origins, theoretical foundations, and central role in contemporary debates. A precise definition of the concept is provided, along with an analysis of its major applications. The research particularly emphasizes AI's strategic importance in a global context marked by accelerated technological transformations and environmental urgencies.

Next, the thesis examines AI's influence on architectural practice by analyzing available tools and their specific applications. Special attention is given to its contributions to sustainable and bioclimatic architecture, where algorithmic solutions offer innovative responses to ecological challenges. The Autodesk Forma platform is analyzed in detail, revealing its potential for sustainable architectural design.

The practical application of these technologies is demonstrated through a case study of a project developed using Autodesk Forma. The analysis covers technical, formal, and functional dimensions, highlighting the platform's optimization capabilities in addressing sustainability requirements.

This methodology is then applied to a studio project: a community center. The tool enables a multifactorial site analysis (wind, sunlight, acoustics), the results of which directly influence the volumetric proposal. This approach demonstrates how AI can transform the design process to generate solutions aligned with contemporary architectural challenges.

Through these steps, this thesis aims to demonstrate how technological evolution—particularly AI—is reshaping architecture while providing effective tools to address sustainability and performance challenges in architectural design.

**Keywords:** Architectural design, artificial intelligence, sustainability, CAD, Autodesk Forma, modularity.

## ملخص

يتناول هذا البحث المسار التاريخي لتطور التصميم المعماري عبر العصور، انتلاً من جذوره الأولى وصولاً إلى عصرنا الرقمي الراهن. ويسلط الضوء على الأدوار المحورية التي لعبتها النمطية المعمارية وتقنيات التصميم المدعوم بالحاسوب، إلى جانب التحول الجذري الذي أحدثه الذكاء الاصطناعي في قلب المفاهيم والممارسات التقليدية لهذا الفن. ويظهر الذكاء الاصطناعي التوليد كأحدث تطور في هذه السلسلة، حاملاً معه إمكانيات غير مسبوقة تفتح آفاقاً جديدة أمام العمارة المعاصرة.

يتعقب البحث في استكشاف الذكاء الاصطناعي من خلال رصد جذوره التاريخية، وتأصيله النظري، ودوره المحوري في النقاشات المعمارية المعاصرة، مقدماً تعريفاً دقيقاً للمفهوم وتحليلياً لأهم تطبيقاته العملية.

كما تسلط الدراسة الضوء على الأهمية الاستراتيجية للذكاء الاصطناعي في سياق عالمي تت山区 فيه التحوّلات التكنولوجية، وتتقاطع فيه هذه التحوّلات مع التحديات البيئية المتزايدة.

تنتقل الأطروحة بعد ذلك إلى تحليل أثر الذكاء الاصطناعي على الممارسة المعمارية المعاصرة، من خلال استعراض الأدوات والتقنيات المتاحة وتطبيقاتها العملية. وينبع تركيز خاص لبرنامج أوتوسك فورما، لمساهمته في تعزيز العمارة المستدامة والحيوية المناخ، حيث تقدم الخوارزميات حلولاً مبتكرة لمواجهة التحديات البيئية.

ويتجلى الجانب العملي لهذه التقنيات من خلال دراسة مشروع معماري تم تنفيذه باستخدام أوتوسك فورما حيث يغطي التحليل الجوانب التقنية والشكلية والوظيفية، مسلطاً الضوء على كفاءة المنصة في الاستجابة لمتطلبات الاستدامة.

كما يتم توظيف هذه المنهجية في مشروع تطبيقي ضمن ورشة عمل لتصميم مركز مجتمعي. وستستخدم الأداة في تحليل متعدد العوامل لموقع المشروع (اتجاهات الرياح، إشعاع الشمس، العوامل الصوتية)، لتؤثر النتائج مباشرةً على تشكيل المقتراح المعماري. وتنظر هذه التجربة كيف يمكن للذكاء الاصطناعي أن يعيد تشكيل عملية التصميم، ليتّنجز حلولاً تلائم التحديات المعمارية الراهنة.

من خلال هذا الطرح، تهدف الأطروحة إلى إبراز كيف يُعيد التطور التكنولوجي – وفي مقدمته الذكاء الاصطناعي – صياغة مشهد العمارة المعاصرة، موفراً أدوات فعالة تعين المعماريين على مواجهة متطلبات الاستدامة وتحقيق الأداء الأمثل في التصميم.

**الكلمات المفتاحية:** التصميم المعماري، الذكاء الاصطناعي، الاستدامة، التصميم بمساعدة الحاسوب، أوتوسك فورما، التصميم المعياري

# Sommaire

<b>I. Chapitre Introductif .....</b>	<b>2</b>
I.1    Introduction générale.....	2
I.2    Problématique générale .....	3
I.3    Problématique spécifique .....	4
I.4    Hypothèses .....	4
I.5    Objectifs de recherche .....	4
<b>II. Chapitre 01 : évolution du processus de conception architecturale .....</b>	<b>6</b>
II.1    Introduction.....	6
II.1.1    Les trois systèmes de pensée .....	6
II.1.1.1    Le raisonnement intuitif.....	6
II.1.1.2    Le raisonnement analytique .....	7
II.1.1.3    Le raisonnement métacognitif.....	7
II.1.2    Les trois figures de J. Christopher Jones.....	8
II.1.2.1    Le concepteur magicien.....	8
II.1.2.2    Le concepteur ordinateur .....	8
II.1.2.3    Le concepteur auto-organisé .....	8
II.2    Historique du processus de conception architecturale.....	10
II.2.1    Les origines de la conception architecturale.....	10
II.2.1.1    L'Antiquité : les premières civilisations .....	10
II.2.1.2    Architecture islamique.....	11
II.2.1.3    L'époque moderne : l'industrialisation et au-delà .....	12
II.2.3    Les étapes de l'évolution technologique en architecture .....	13
<b>III. Chapitre 02 : L'IA, Révolution Technologique et Architecturale .....</b>	<b>18</b>
III.1    Contexte historique : l'apparition de l'intelligence artificielle.....	18
III.1.1    Origine de l'IA .....	18
III.1.2    Les hivers de l'IA .....	19
III.2    Définition .....	20
III.3    Fonctionnement .....	20
III.4    Modèles d'IA.....	21
III.4.1    Machine Learning (ML).....	21
III.4.2    Deep Learning (DL) : .....	21
III.4.3    Réseaux de Neurones : .....	22
III.4.4    LLM (Large Language Models) : .....	22

III.5	Types d'IA .....	22
III.6	Applications de l'IA par Secteur.....	23
III.7	Les impacts de l'IA sur l'environnement .....	23
III.7.1	Les impacts négatifs attendus .....	23
III.7.2	L'empreinte environnementale de l'IA .....	24
III.7.3	Une explosion de la consommation d'électricité .....	24
III.8	Risques et Opportunités.....	25
III.8.1	Les avantages de l'IA .....	25
III.8.2	Les risques et défis associés à l'IA .....	26
III.9	L'IA en architecture .....	27
III.9.1	Exemple d'application d'IA en architecture .....	27
III.9.2	Différents outils IA selon la catégorie .....	28
III.9.2.1	Analyse de site .....	28
III.9.2.2	Génération de plan .....	30
III.9.2.3	Conception de croquis et rendus architecturaux.....	32
III.9.2.4	Architecture intérieur .....	34
III.9.2.5	Modélisation 3D.....	36
III.9.2.6	Dessin d'exécution.....	38
III.9.2.7	Immobilier.....	39
III.10	IA au service de l'architecture bio climatique et durable .....	41
III.10.1	Définition de l'architecture bio climatique .....	41
III.10.2	Aperçue historique .....	41
III.10.3	Principes architecture bioclimatique.....	41
III.10.4	Architecture durable .....	43
III.10.4.1	Historique .....	43
III.10.4.2	Techniques principales de l'architecture durable .....	44
III.11	Démarche HQE .....	45
III.11.1	Introduction à la démarche HQE .....	45
III.11.2	Historique de la démarche HQE .....	45
III.11.3	Qui délivre le label HQE ? .....	45
III.11.4	Les trois niveaux du label HQE .....	46
III.11.5	Le coût du label HQE .....	46
III.11.6	Méthodologie de la HQE .....	46
III.11.7	Les 14 cibles.....	47
III.11.8	Exemples de plateformes IA pour la conception de bâtiments durables HQE : .....	47

III.12	Autodesk Forma .....	48
III.12.1	Fonctionnalités Principales.....	48
III.12.2	Cas d'Usage .....	49
III.12.3	Tarification et Disponibilité .....	49
<b>IV.</b>	<b>Analyse d'exemples .....</b>	<b>51</b>
IV.1	Complexe de logements étudiants à Malmi.....	51
IV.1.1	Description du projet.....	51
IV.1.2	Stratégies de conception pour un site urbain complexe.....	52
IV.1.3	Synthèse 01 : Simulation des niveaux sonores et optimisation acoustique .....	53
IV.1.4	Synthèse 02 : analyse d'ensoleillement .....	54
IV.1.5	Synthèse 03 : analyse de lumière naturelle .....	55
IV.1.6	Analyse critique .....	56
IV.2	Georgia Tech Campus Center.....	57
IV.2.1	Description du projet.....	57
IV.2.2	Objectifs du projet.....	58
IV.2.3	Analyse climatique et stratégies de conception.....	58
IV.2.4	Optimisation du projet grâce à l'analyse Cove.tool : Synthèse et applications concrètes	59
IV.2.4.1	Carte des ombres.....	59
IV.2.4.2	Cartes de rayonnement .....	60
IV.2.4.3	Microclimat.....	60
IV.2.4.4	Étude de la lumière naturelle et de l'éblouissement .....	60
IV.2.4.5	Études de façade.....	61
IV.2.4.6	Analyse de l'utilisation de l'eau .....	62
IV.2.5	Analyse critique .....	63
<b>V.</b>	<b>Cas d'étude : Centre communautaire HQE .....</b>	<b>65</b>
V.1	Présentation de la ville de Béjaia .....	65
V.2	Accessibilité .....	65
V.3	Données climatiques .....	66
V.4	La topographie.....	66
V.5	Site d'intervention.....	67
V.5.1	Présentation et délimitation du terrain : .....	67
V.5.2	Etat des lieux .....	68
V.5.2.1	Constat.....	68
V.5.3	Accessibilité .....	69

V.5.3.1	Constat.....	69
V.5.4	Proposition urbaine .....	70
V.6	De l'analyse numérique au schéma de principes : méthodologie avec Autodesk Forma.....	71
V.6.1	Création de compte / inscription .....	71
V.6.2	Création du site d'intervention .....	71
V.6.3	Activer les différents options (bâtiments / terrain / route / topographie).....	72
V.6.4	Interface Autodesk forma .....	72
V.6.5	Importer la proposition urbaine.....	73
V.6.6	Analyse de site.....	73
V.6.6.1	Ensoleillement .....	73
V.6.6.2	Vents .....	74
V.6.6.3	Potentiel d'éclairage naturel.....	75
V.6.6.4	Bruit .....	76
V.6.6.5	Energie solaire .....	77
V.6.7	Synthèse circulation + bruit.....	77
V.6.8	Synthèse données climatiques .....	78
V.6.9	Les décisions à prendre .....	78
V.6.10	Créer des propositions de conception .....	79
V.6.11	Comparer les différents propositions.....	80
V.6.11.1	Synthèse et choix .....	81
V.7	Schéma de principes.....	82
V.8	Genèse.....	82
V.9	Concepts et logo.....	83
V.10	Les principes bioclimatiques .....	84
V.11	Préprogramme .....	84
V.12	Simulations et performances : Étude du projet sous Forma.....	85
V.12.1	Analyse d'ensoleillement .....	85
V.12.1.1	Constat.....	85
V.12.2	Analyse d'éclairage naturel .....	86
V.12.2.1	Constat.....	86
V.12.3	Analyse de performance énergétique.....	86
V.12.3.1	Constat.....	86
V.12.4	Analyse de bruit.....	87
V.12.4.1	Constat.....	87
V.12.5	Analyse de vent .....	87

V.12.5.1	Constat.....	88
V.12.6	Analyse de microclimat .....	88
V.12.6.1	Constat.....	88
<b>VI.</b>	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>89</b>
<b>VII.</b>	<b>Référence bibliographique .....</b>	<b>91</b>

# Table des illustrations

<b>Figure 1</b> « Designer as a magician », « Designer as a computer » et « Designer as a self-organizing system ». Caricatures redessinées par Damien Claeys [22] d'après les dessins originaux de J. Christopher Jones .....	8
<b>Figure 2</b> Mise en relation circulaire de trois systèmes de raisonnement en conception architecturale (stratégies heuristiques, raisonnements algorithmiques, retours métacognitifs) associés respectivement à trois portraits de concepteurs (concepteur- magicien, concepteur- ordinateur, concepteur auto-organisé).....	9
<b>Figure 3</b> Plan de Girsu, ancienne Tello, fin du IIIe millénaire (musée du Louvre, AO 338). Photo Cécile Michel.....	10
<b>Figure 4</b> Andrea Palladion- Leoni Edition - Le temple d'Héphaïstos .....	10
<b>Figure 5</b> Variables de l'architecture contemporaine.....	10
<b>Figure 6</b> Exemplification of the Vitruvian triad: firmitas, utilitas, venustas.....	11
<b>Figure 7</b> Saint-Denis, abbatiale. Axonométrie du massif occidental de Suger, d'après C. Granberry, S. McKnight Crosby et P.Z. Blum .....	11
<b>Figure 8</b> La mosquée Süleymaniye ou mosquée de Soliman (en turc Süleymaniye Camii), conçue par l'architecte Sinan pour le sultan Soliman le Magnifique et construite de 1550 à 1557 .....	12
<b>Figure 9</b> époque moderne et industrialisation.....	12
<b>Figure 10</b> Principe des maisons types de Walter Gropius.....	13
<b>Figure 11</b> Rendu 3D de la Marquette Cité radieuse (appartements sortis) .....	13
<b>Figure 12</b> Modules qui composent la maison Auerbach.....	13
<b>Figure 13</b> Le projet SEEK, Architecture Machine Groupe 1969-1970 .....	14
<b>Figure 14</b> La superposition d'URBAN 5 et le tube cathodique IBM 2250 modèle 1 .....	14
<b>Figure 15</b> Patrick HANRATTY - Pronto .....	14
<b>Figure 16</b> Rendu ZAHA Hadid .....	15
<b>Figure 17</b> Maquette de stade conçue selon des courbes d'égalité visuelle, présentée par Luigi Moretti à la Triennale de Milan, 1960 .....	15
<b>Figure 18</b> Ivan Sutherland's 1963 Sketchpad .....	15
<b>Figure 19</b> Source: www.journaldunet.com .....	16
<b>Figure 20</b> Intelligence artificielle : que le meilleur gagne ! .....	16
<b>Figure 21</b> John McCarty .....	16
<b>Figure 22</b> Le test de Turing (1950) .....	18
<b>Figure 23</b> Victoire de Deep Blue sur Kasparov (1997).....	19
<b>Figure 24</b> schéma fonctionnement d'une IA .....	20
Figure 25 les modèles d'IA.....	21
<b>Figure 26</b> Schéma d'un process de Machine Learning .....	21
<b>Figure 27</b> Schéma d'un process de Deep Learning.....	21
<b>Figure 28</b> À gauche le schéma d'un neurone biologique et à droite le schéma du neurone formel de 1943.....	22
<b>Figure 29</b> empreinte écologique .....	24
<b>Figure 30</b> IA datta center et cryptomonnaies font exploser la consommation mondiale de l'électricité .	25
<b>Figure 31</b> interface Spatialzer .....	28
<b>Figure 32</b> interface Testfit .....	28
<b>Figure 33</b> interface coo tool .....	29
<b>Figure 34</b> interface archistar .....	29

<b>Figure 35</b> interface maket .....	30
<b>Figure 36</b> interface laiout .....	30
<b>Figure 37</b> interface finch3d .....	31
<b>Figure 38</b> interface architecture.....	31
<b>Figure 39</b> interface planfinder.....	31
<b>Figure 40</b> interface Photoshop .....	32
<b>Figure 41</b> interface midjourney.....	32
<b>Figure 42</b> interface lookx ai .....	33
<b>Figure 43</b> interface arko .....	33
<b>Figure 44</b> interface promeai.....	33
<b>Figure 45</b> interface planner5d.....	34
<b>Figure 46</b> interface airoomplanner .....	34
<b>Figure 47</b> interface roomgpt .....	35
<b>Figure 48</b> interface spacely ai.....	35
<b>Figure 49</b> interface homedesigns .....	35
<b>Figure 50</b> interface luma ai.....	36
<b>Figure 51</b> interface spline ai .....	36
<b>Figure 52</b> interface sloyd ai .....	37
<b>Figure 53</b> interface meshy ai .....	37
<b>Figure 54</b> interface snaptrude.....	38
<b>Figure 55</b> interface swapp .....	38
<b>Figure 56</b> interface kurby .....	39
<b>Figure 57</b> interface parafin.....	39
<b>Figure 58</b> interface jurny .....	40
<b>Figure 59</b> interface likely ai .....	40
<b>Figure 60</b> L'architecture traditionnelle et bio climatique au Mali .....	41
<b>Figure 61</b> exemple de maison bioclimatique .....	41
<b>Figure 62</b> schéma d'orientation recommandé des espaces .....	42
<b>Figure 63</b> les principes d'architecture bioclimatique .....	43
<b>Figure 64</b> la certification HQE Aménagement.....	45
<b>Figure 65</b> les niveaux de HQE.....	46
<b>Figure 66</b> analyse autodesk forma .....	48
<b>Figure 67</b> analyse d'ensoleilemnt forma .....	49
<b>Figure 68</b> Source: OpenStreetMap.....	51
<b>Figure 69</b> Résidence étudiante à Malmi.....	51
<b>Figure 70</b> Plan de masse .....	51
<b>Figure 71</b> Plan .....	52
<b>Figure 72</b> Cour centrale .....	52
<b>Figure 73</b> Coupe montrant le volume optimisé du bâtiment et son orientation vers le sud .....	53
<b>Figure 74</b> Analyse du bruit de forme montrant comment le volume cylindrique crée un intérieur abrité .....	53
<b>Figure 75</b> Analyse d'ensoleiment .....	54
<b>Figure 76</b> Comparaison des performances : Cour centrale plate vs surélevée.....	55
<b>Figure 77</b> analyse de lumière naturelle.....	55
<b>Figure 78</b> Source : openstreetmap.....	57
<b>Figure 79</b> plan de masse.....	57
<b>Figure 80</b> Résultats d'analyse climatique ( température – rayonnement solaire – humidité ) .....	58

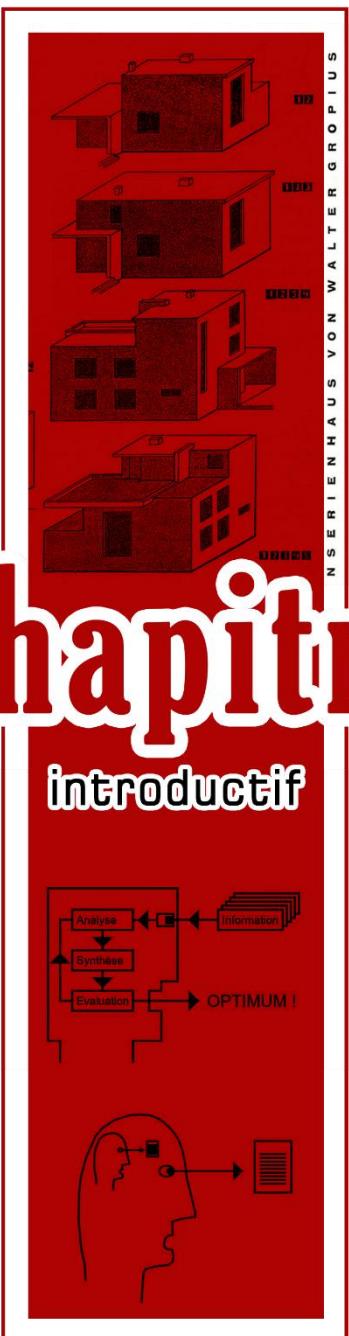
<b>Figure 81</b> Résultats d'analyse climatique ( Vents –Graphique psychométrique) .....	59
<b>Figure 82</b> carte des ombres.....	59
<b>Figure 83</b> carte de rayonnement.....	60
<b>Figure 84</b> Microclimat .....	60
<b>Figure 85</b> étude de lumière naturelle .....	60
<b>Figure 86</b> Étude d'éblouissement 1 : Salle d'exposition, salle du 2e étage, orientée au sud .....	61
<b>Figure 87</b> dispositifs de façade .....	61
<b>Figure 88</b> diagramme cove tool sur l'analyse de facades .....	62
<b>Figure 89</b> situation de la ville de bejaia.....	65
<b>Figure 90</b> accessibilité .....	65
<b>Figure 91</b> moyenne mensuelle des températures et des précipitations .....	66
<b>Figure 92</b> Carte arte topographique Béjaïa, altitude, relief..	66
<b>Figure 93</b> Site intervention.....	67
<b>Figure 94</b> Etat de fait .....	68
<b>Figure 95</b> Accessibilité .....	69
<b>Figure 96</b> Propositione urbaine .....	70
<b>Figure 97</b> creation de compte .....	71
<b>Figure 98</b> creation du site d'intervention.....	71
<b>Figure 99</b> les différents options Autodesk forma.....	72
<b>Figure 100</b> interface Autodesk forma .....	72
<b>Figure 101</b> importation .....	73
<b>Figure 102</b> analyse d'ensoleilment.....	73
<b>Figure 103</b> Analyse des vents .....	74
<b>Figure 104</b> analyse des vents 2D .....	74
<b>Figure 105</b> Potentiel d'éclairage naturel .....	75
<b>Figure 106</b> Analyse du bruit .....	76
<b>Figure 107</b> analyse de bruit 3D .....	76
<b>Figure 108</b> analyse d'energie solaire.....	77
<b>Figure 109</b> Synthèse circulation + bruit.....	77
<b>Figure 110</b> Synthèse données climatiques.....	78
<b>Figure 111</b> Proposition 01 .....	79
<b>Figure 112</b> proposition 02 .....	79
<b>Figure 113</b> proposition 03 .....	79
<b>Figure 114</b> analyse d'ensoleillement.....	80
<b>Figure 115</b> analyse de lumière naturelle.....	80
<b>Figure 116</b> analyse du bruit.....	80
<b>Figure 117</b> analyse de microclimat .....	81
<b>Figure 118</b> analyse des vents .....	81
<b>Figure 119</b> schéma de principes.....	82
<b>Figure 120</b> Logo du projet .....	83
<b>Figure 121</b> Les principes bioclimatiques .....	84
<b>Figure 122</b> Analyse d'ensoleillement projet Kaizen .....	85
<b>Figure 123</b> Analyse d'éclairage naturel projet Kaizen .....	86
<b>Figure 124</b> Analyse de performance énergétique projet kaizen.....	86
<b>Figure 125</b> Analyse de bruit projet kaizen.....	87
<b>Figure 126</b> analyse des vents projet kaizen .....	87
<b>Figure 127</b> analyse de microclimat projet kaizen.....	88



# Glossaire

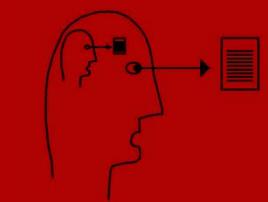
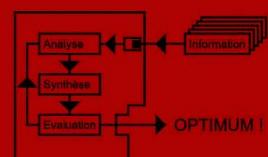
<b>Métacognition</b>	Connaissance personnelle d'un individu sur ses capacités et ses fonctionnements cognitifs.
<b>CAO</b>	Abréviation du (conception assistée par ordinateur) permet de créer des dessins 2D et des modèles 3D numériques. La création de ces modèles permet aux utilisateurs d'itérer et d'optimiser les conceptions afin de respecter l'intention de conception.
<b>Papyrus</b>	Plante des bords du Nil dont la tige servait à fabriquer des feuilles pour écrire.
<b>BIM</b>	Acronyme (Building Information Modeling), c'est une technologie et des processus associés pour produire, communiquer et analyser des modèles de construction.
<b>SIG</b>	Acronyme (Système d'Information Géographique), il permet de collecter, stocker, gérer, analyser et visualiser des données géographiques ou spatiales, souvent sous forme de cartes
<b>AMG</b>	(Architecture Machine Group) désigne un groupe de recherche fondé en 1967 au sein de l'École d'architecture du MIT par Nicholas Negroponte et Leon Grossier. Ce groupe, composé d'architectes, d'ingénieurs électriques et d'étudiants, avait pour objectif de repousser les limites du dessin informatique et de développer des interactions homme-machine avancées,
<b>Réseaux neurones</b>	une méthode d'intelligence artificielle qui apprend à des ordinateurs à traiter les données d'une manière inspirée par le cerveau humain.
<b>Big data</b>	définit des ensembles de données numériques très considérables, variés et générés à grande vitesse, ils dépassent les capacités des outils traditionnels de gestion et requis des technologies spécifiques pour être collectés, stockés, analyses et exploités
<b>Image net</b>	Base de données d'images annotées par des humains qui est destinée à des travaux de recherche en vision par ordinateur ainsi qu'en apprentissage profond et dont la qualité a été contrôlée
<b>Open AI</b>	Est une entreprise américaine d'intelligence artificielle (IA) fondée en 2015 à San Francisco en Californie. Sa mission est de développer et de promouvoir une intelligence artificielle générale « sûre et bénéfique à toute l'humanité »
<b>Machin LISP</b>	Est un langage de programmation créé en 1958, conçu pour manipuler des listes et traiter des données symboliques. Il se distingue par sa syntaxe basée sur les parenthèses et est largement utilisée en intelligence artificielle pour sa capacité à manipuler le code et les données de façon flexible

<b>GPT – 4</b>	(Generative Pre-Trained Transformer 4) est un modèle d'intelligence artificielle développé par OpenAI, capable de comprendre et de générer du texte (et des images) de manière naturelle et cohérente
<b>Chat bots</b>	Est un programme informatique qui simule et traite une conversation humaine (écrite ou parlée), permettant aux humains d'interagir avec des terminaux numériques comme s'ils communiquaient avec une personne réelle
<b>ADEME</b>	(Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) est un établissement public qui a pour missions premières de favoriser la protection de l'environnement et les économies d'énergie.
<b>ONG</b>	Abréviation d'organisation non gouvernementale, sont des acteurs privés qui agissent sur le plan national et international. Ils prennent différentes formes (associations, fondations, institutions...) et interviennent dans des secteurs tels que l'humanitaire, l'environnement, la liberté de la presse...
<b>Deep fake</b>	Une abréviation de "Deep Learning" et "Fake", qui peut être traduit par "fausse profondeur". En fait, il fait référence à des contenus faux qui sont rendus profondément crédibles par l'intelligence artificielle.
<b>Loi Grenelle</b>	La loi Grenelle 1, adoptée en 2009, fixe les grands objectifs de la France en matière d'environnement et de développement durable. Elle sert de cadre général pour lutter contre le changement climatique, protéger la biodiversité
<b>Certivéa</b>	Est un organisme certificateur français, leader dans la certification et la labellisation des bâtiments tertiaires (non résidentiels), des infrastructures et de l'aménagement du territoire,
<b>Data-driven</b>	Signifie que les décisions, stratégies et actions d'une organisation sont guidées et fondées sur l'analyse de données objectives, plutôt que sur des intuitions ou des suppositions



# Chapitre

## introductif



# I. Chapitre Introductif

## I.1 Introduction générale

L'architecture, en tant que discipline, a toujours été un point de jonction entre l'art, la science et la technique. Depuis l'Antiquité, les architectes ont cherché à créer des espaces qui répondent aux besoins humains tout en reflétant les valeurs culturelles et sociales de leur époque. Avant l'apparition de l'intelligence artificielle (IA), le processus de conception architecturale reposait principalement sur des méthodes manuelles, des dessins à la main, des maquettes physiques et des calculs complexes réalisés par des experts. Les outils traditionnels, tels que les plans dessinés sur papier et les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) de première génération, ont longtemps dominé le domaine. Cependant, ces méthodes, bien qu'efficaces, étaient souvent limitées par leur faiblesse, leur coût élevé et leur incapacité à gérer des données complexes ou à explorer rapidement des alternatives de conception.

Le processus traditionnel de conception architecturale faisait face à divers défis significatifs. Dans un premier temps, la gestion des contraintes techniques, environnementales et réglementaires demandait beaucoup de temps, ce qui retardait l'avancement des projets. En second lieu, la coopération entre les divers intervenants (architectes, ingénieurs, clients) était fréquemment retardée par des contradictions techniques ou des problèmes de communication.

L'avènement de l'intelligence artificielle a créé un changement majeur dans le secteur de l'architecture. Par exemple, dans l'analyse de site, des outils comme **Autodesk Forma**, **TestFit** et **Cove.tool** permettent d'améliorer l'efficacité, la précision et la durabilité des projets architecturaux. Dans la génération de plans, **Finch 3D** et **Maket AI** offrent des solutions flexibles efficaces. Pour l'idéation, **Midjourney** facilite la création de concepts innovants et permet de créer des images photo réalistes et détaillées, en se basant sur des instructions précises. Enfin, les rendus, des outils tels que **Looks AI** et **DALL·E** produisent des visualisations réalistes à partir des croquis et des dessins à main levée.

L'intelligence artificielle offre des avantages majeurs dans le processus de conception. Elle permet une analyse rapide et précise des données, une automatisation des tâches répétitives et une exploration approfondie des solutions de conception. Par exemple, l'IA peut simuler l'impact de différentes orientations de bâtiments sur la consommation énergétique ou générer des designs adaptés aux conditions climatiques locales. Selon une étude de Deloitte, *l'utilisation de l'IA dans la construction et l'architecture pourrait réduire les coûts de conception de 10 à 20 % et accélérer les délais de projet de 30 à 50 %* (Laureano & Galo, 2020). Ces gains de productivité et d'efficacité ouvrent de nouvelles perspectives pour les architectes, notamment dans le domaine des bâtiments haute qualité environnementale (HQE)

La durabilité est en effet devenue une priorité dans l'architecture moderne, avec une attention accrue portée à la réduction de l'empreinte carbone et à l'optimisation des ressources. Les bâtiments HQE intègrent des critères de performance énergétique, de gestion des ressources et de confort des occupants, mais leur conception nécessite des outils capables de modéliser des systèmes complexes. L'IA s'impose comme une solution clé, IA peut simuler le comportement thermique des bâtiments, optimiser l'orientation pour maximiser l'éclairage naturel.

Les logiciels d'IA, comme **Autodesk Forma**, jouent un rôle essentiel dans cette démarche. Ils offrent des fonctionnalités avancées pour simuler des scénarios énergétiques, analyser l'impact des matériaux et améliorer les designs selon les normes HQE. Par exemple, Autodesk Forma utilise des algorithmes pour prédire les performances thermiques d'un bâtiment en fonction de son orientation, de son isolation et de son exposition au soleil. Ces outils positionnent l'IA comme un allié indispensable pour concevoir des bâtiments durables et performants, tout en répondant aux défis environnementaux actuels.

Un exemple concret de l'application de l'IA dans l'architecture durable est le complexe de logements pour étudiants à Malmi, en Finlande, conçu par ACRO Architecture. Ce projet a utilisé des outils d'IA pour optimiser la conception en termes d'efficacité énergétique et de durabilité, réduisant la consommation énergétique tout en améliorant le confort des occupants et réduire l'impact du bruit extérieur sur le confort acoustique. Inspiré par de tels cas, mon projet en atelier consiste à concevoir un centre communautaire HQE en utilisant Autodesk Forma. Cette plateforme m'a permis d'analyser les conditions du site, de simuler les performances énergétiques et d'explorer des solutions de conception adaptées aux normes environnementales. Cette démarche montre comment l'IA peut être intégrée dans la pratique architecturale pour créer des bâtiments innovants et durables.

## I.2 Problématique générale :

L'intelligence artificielle s'impose aujourd'hui comme un outil révolutionnaire dans de nombreux secteurs, et l'architecture n'y échappe pas. Face à des exigences croissantes en matière d'efficacité, de durabilité et d'innovation, les architectes se tournent vers l'IA pour optimiser leurs processus de conception. De nos jours, **l'IA permet-elle une amélioration substantielle des méthodes de conception architecturale ? Quels sont les logiciels disponibles sur le marché qui intègrent l'IA et comment aident-ils les architectes à créer des projets plus fonctionnels, esthétiques et optimisés énergétiquement ?**

Malgré ces avancées, l'intégration de l'IA soulève de nombreux défis : manque de fiabilité, difficultés d'intégration avec les outils existants, et la nécessité de compétences spécifiques pour exploiter pleinement ces technologies. **Comment l'IA peut-elle, dans ce contexte, répondre aux attentes des architectes tout en conservant une certaine flexibilité et créativité ?**

### I.3 Problématique spécifique :

Dans un contexte où le développement durable et l'architecture bioclimatique deviennent des impératifs, l'intelligence artificielle émerge comme un outil puissant pour optimiser la conception des bâtiments, en conciliant performance énergétique, réduction de l'impact environnemental et qualité d'usage. **Comment les logiciels intégrant l'IA, tels qu'Autodesk Forma, peuvent-ils contribuer à la conception d'un Bâtiment Haute Qualité Environnementale (HQE), en répondant aux exigences écologiques tout en préservant les impératifs esthétiques et fonctionnels ?** Plus précisément, quelles fonctionnalités IA permettent de simuler et d'optimiser les conditions climatiques, ainsi que d'ajuster les paramètres énergétiques d'un bâtiment ? En prenant pour cas d'étude un centre communautaire HQE, dans quelle mesure ces technologies peuvent-elles favoriser une intégration optimale des principes de l'architecture bioclimatique, assurant ainsi une conception à la fois durable, efficiente et adaptée aux besoins des usagers ?

### I.4 Hypothèses

- 1- L'IA améliore la manière dont les architectes travaillent, conçoivent et interagissent avec leur environnement :

Elle utilise des méthodes de conception basées sur des données et des simulations précises, optimisant les processus créatifs et techniques.

- 2- L'IA contribue à la création de bâtiments plus respectueux de l'environnement :

En analysant des données complexes sur les matériaux, l'énergie et les impacts écologiques, l'IA permet de concevoir des bâtiments durables et conformes aux normes HQE

### I.5 Objectifs de recherche

- 1- Explorer l'impact de l'intelligence artificielle (IA) sur le processus de conception architecturale, en mettant en lumière les transformations qu'elle apporte aux méthodes de travail des architectes.
- 2- Explorer les différents logiciels d'intelligence artificielle selon leurs catégories
- 3- Comprendre le rôle de l'IA dans la conception de bâtiments durables, en particulier les bâtiments Haute Qualité Environnementale (HQE), et évaluer leur efficacité pour répondre aux enjeux environnementaux.
- 4- Étudier les fonctionnalités et les apports du logiciel Autodesk Forma dans l'amélioration des projets architecturaux, en se focalisant sur les simulations énergétiques et environnementales.
- 5- Identifier les avantages et les limites de l'IA dans l'architecture, en abordant des aspects techniques, éthiques et créatifs.



## II. Chapitre 01 : évolution du processus de conception architecturale

### II.1 Introduction

L'histoire des recherches sur les systèmes de raisonnement en psychologie cognitive s'est développée petit à petit avec des recherches menées par des psychologues et scientifiques qui ont cherché à comprendre comment le cerveau humain fonctionne.

Tout a commencé avec **Jean Piaget** dans les années 1920-1970. Il a étudié comment les enfants développent leur capacité à raisonner, passant d'une pensée intuitive et concrète à une pensée plus logique et abstraite en grandissant. (Jean, 1991) Ses travaux ont posé les bases pour comprendre comment l'humain apprend à résoudre des problèmes. (In.Indriyani & Sobandi, 2024)

Ensuite, dans les années 1970-1980, **Daniel Kahneman** et **Amos Tversky** ont expliqué qu'il existe deux façons de penser. La première est rapide et intuitive (reconnaître un ami dans la rue). La seconde est lente et réfléchie (faire un calcul difficile). Ils ont montré que parfois, notre intuition nous trompe, et il faut réfléchir pour corriger nos erreurs. (Nagel, 1993)

Plus tard, dans les années 1990, **Olivier Houdé** a ajouté une troisième idée : la métacognition. C'est la capacité à réfléchir sur nos propres pensées. (Olivier, 2003) il a montré que pour bien raisonner, il faut parfois arrêter nos intuitions et prendre le temps de réfléchir.

En architecture, les trois figures de **John Christopher Jones** (publiées en 1970 dans son livre « **Design Methods: Seeds of Human Futures** » montrent différentes façons de concevoir un projet, qui ressemblent aux systèmes de pensée en psychologie cognitive.

La première figure, **le designer magicien** (boîte noire), représente l'intuition : les idées viennent comme par magie, sans qu'on sache vraiment comment). La deuxième, **le designer ordinateur** (boîte de verre), représente une approche rationnelle et systématique, alignée sur la pensée réfléchie, où chaque étape du processus est transparente et logique. Enfin, la troisième figure, **le designer réflexif**, c'est quand le concepteur prend du recul, réfléchit sur ce qu'il fait et ajuste ses idées pour améliorer son projet. Ces trois approches, développées dans les années 1960-1970, expliquent comment les architectes mèlagent intuition, logique et réflexion pour créer, des idées. (Broadbent G. , 1969)

#### II.1.1 Les trois systèmes de pensée

##### II.1.1.1 Le raisonnement intuitif

Le raisonnement instinctif, lié au Système 1, est un mécanisme de pensée qui est rapide, automatique et généralement inconscient. Il s'appuie sur des heuristiques, des procédés mentaux qui facilitent la prise de décisions rapide, sans nécessiter un effort intentionnel. Ce genre de pensée est primordial dans des contextes où une réaction rapide est nécessaire.

**Caractéristiques :**

- Vitesse : ce système opère de façon presque immédiate, sans nécessiter un effort délibéré. Cela permet une réponse rapide aux stimuli de l'environnement.
- Automatisme : Cela se déclenche sans qu'on s'en rende compte, en réponse à des situations familières ou à des schémas mentaux déjà établis.

### **Applications en conception architecturale**

- Génération d'idées : Le concepteur s'appuie sur des heuristiques afin de générer des idées novatrices et instinctives, généralement lors des étapes initiales du processus de création.
- Prise de décision instantanée : Dans des contextes ambigus et compliqués, le Système 1 offre la possibilité de statuer rapidement, même si parfois de manière imprécise.

#### **II.1.1.2 Le raisonnement analytique**

Il implique un processus de réflexion délibéré, maîtrisé et conscient. Il s'appuie sur des méthodes algorithmiques, ainsi que des techniques logiques et mathématiques, pour solutionner des problèmes spécifiques. Ce genre de réflexion est crucial pour gérer des données complexes et effectuer des choix exacts, toutefois il demande une dépense cognitive conséquente.

##### **Caractéristiques :**

- Lenteur et contrôle : ce Système fonctionne de manière lente et nécessite un effort conscient et une concentration soutenue.
- Précision et fiabilité : Les algorithmes du ce Système permettent de résoudre des problèmes complexes de manière précise et fiable.

### **Applications en conception architecturale**

- Formalisation des projets : Le concepteur utilise des algorithmes pour développer des solutions détaillées et techniques, comme les plans techniques et les calculs structurels.
- Résolution de sous-problèmes : Le Système 2 est particulièrement utile pour résoudre des problèmes bien définis, en décomposant les tâches complexes en étapes plus simples.

#### **II.1.1.3 Le raisonnement métacognitif**

Est une démarche de réflexion qui offre la possibilité de gérer et de trancher entre les intuitions instantanées du raisonnement intuitif et les études minutieuses du raisonnement analytique. Cela s'appuie sur la métacognition, soit la faculté de réfléchir sur ses propres processus cognitifs et de les adapter selon les exigences.

##### **Caractéristiques :**

- Régulation : Il inclut la capacité à évaluer et à ajuster les processus cognitifs, en choisissant entre heuristiques et algorithmes.
- Réflexivité : Le Système 3 permet de prendre du recul sur ses propres pensées et décisions, en intégrant une dimension critique et adaptative.

### **Applications en conception architecturale**

- Apprentissage et perfectionnement : La métacognition encourage l'apprentissage constant en aidant le concepteur à apprendre de ses expériences antérieures et à bonifier ses techniques de travail.

## II.1.2 Les trois figures de J. Christopher Jones

J. Christopher Jones, un précurseur dans l'art du design et de la création, a suggéré trois illustrations représentatives pour caractériser les diverses attitudes que peuvent prendre les designers lors de leur démarche créative. Ces trois types, le concepteur magicien, le concepteur ordinateur et le concepteur auto-organisé – représentent les diverses approches des concepteurs face aux défis de conception, fusionnant intuition, logique et introspection. Ces figures correspondent de manière analogique aux trois systèmes de raisonnement.

« *La conception peut être envisagée sous trois angles : la créativité (boîte noire), la rationalité (boîte de verre) et le contrôle (système auto-organisé). Chacun offre une perspective unique pour comprendre et améliorer le processus de conception* ». (Broadbent G., 1969)

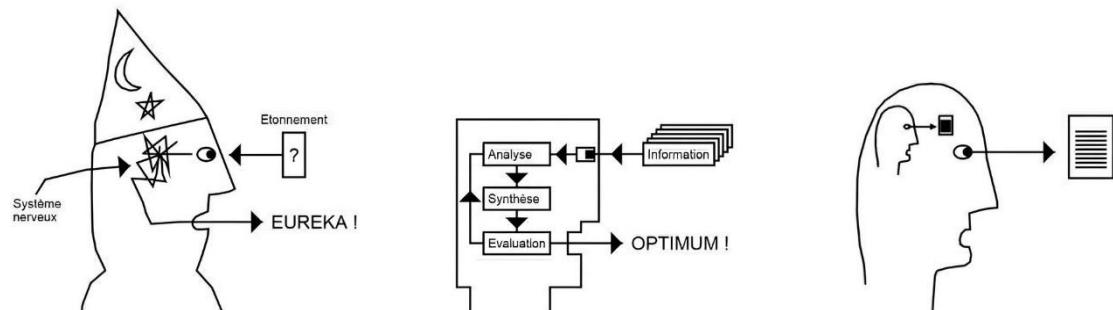


Figure 1 « Designer as a magician », « Designer as a computer » et « Designer as a self-organizing system ». Caricatures redessinées par Damien Claeys [22] d'après les dessins originaux de J. Christopher Jones \*

Source: Livre Design Methods in Architecture (Broadbent, Geoffrey )

### II.1.2.1 Le concepteur magicien

Représente l'expression intuitive et spontanée de la créativité. Il se sert de heuristiques pour produire des idées novatrices et des résolutions inventives, fréquemment fondées sur des instincts et des sentiments. *"Le concepteur, vu sous l'angle créatif, est une boîte noire d'où émerge le mystérieux saut créatif. Cette vision poétique du designer comme magicien décrit ce qui sous-tend l'action de tout être humain doté d'un système nerveux."* (Broadbent G., 1969)

Dans le domaine de l'architecture : il représente la première étape du processus de création, où l'architecte examine des idées générales et des concepts innovants. (Broadbent G., 1969)

### II.1.2.2 Le concepteur ordinateur

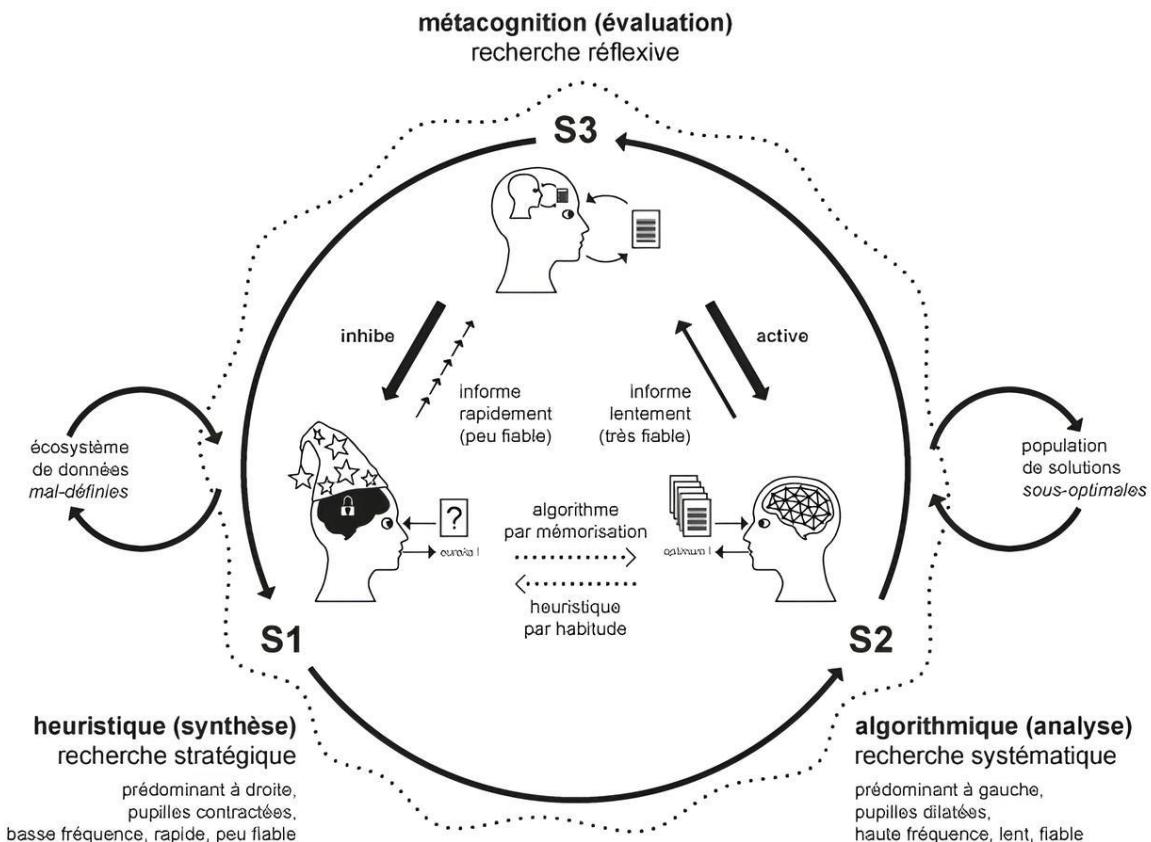
Représente la rigueur analytique et systématique. Il applique des algorithmes et des méthodes logico-mathématiques pour résoudre des problèmes techniques et structuraux.

En architecture : Cette figure correspond à la phase de développement du projet, où l'architecte utilise des outils techniques, des logiciels de modélisation et des calculs précis pour formaliser les idées initiales. Par exemple, l'architecte peut utiliser des logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) pour créer des plans détaillés et des modèles 3D

### II.1.2.3 Le concepteur auto-organisé

Incarne la réflexivité et la capacité d'adaptation. Il recourt à la métacognition pour évaluer et gérer son processus de création, en modifiant les concepts et les réponses selon les exigences et les restrictions.

En Architecture : Ce moment correspond à l'étape d'évaluation et de régulation du projet, durant laquelle l'architecte réfléchit pour juger la cohérence et la pertinence des solutions suggérées. Par exemple, l'architecte peut tenir des séances de coordination avec les ingénieurs et les clients d'adapter les plans selon leurs retours.



**Figure 2** Mise en relation circulaire de trois systèmes de raisonnement en conception architecturale (stratégies heuristiques, raisonnements algorithmiques, retours métacognitifs) associés respectivement à trois portraits de concepteurs (concepteur-magicien, concepteur-ordinateur, concepteur auto-organisé)

Source : [https://www.academia.edu/84804605/Trois\\_syst%C3%A8mes\\_de\\_raisonnement\\_en\\_conception\\_architecturale](https://www.academia.edu/84804605/Trois_syst%C3%A8mes_de_raisonnement_en_conception_architecturale)

## II.2 Historique du processus de conception architecturale

### II.2.1 Les origines de la conception architecturale

La conception architecturale remonte à la préhistoire, où les premiers humains ont commencé à créer des abris et des structures pour se protéger des intempéries. Ces premières constructions étaient simples, mais elles marquaient le début d'un processus de conception qui allait évoluer au fil des millénaires.

#### II.2.1.1 L'Antiquité : les premières civilisations

- **La Mésopotamie et l'Égypte ancienne**

Durant les périodes mésopotamienne et égyptienne antique, le processus de conception architecturale se caractérisait par une approche méthodique et symbolique, où chaque élément de construction était soigneusement planifié et porteur de significations profondes. Les architectes de ces époques utilisaient des esquisses et des plans, souvent inscrits sur des tablettes d'argile ou des **papyrus**, pour orchestrer la réalisation d'édifices monumentaux tels que les ziggourats et les pyramides. (Baudouin, 2021)



Figure 3 Plan de Girsu, ancienne Tello, fin du IIIe millénaire (musée du Louvre, AO 338).  
Source : <https://lejournal.cnrs.fr>

- **La Grèce antique et Rome**

Durant cette période le processus de conception architecturale a atteint un niveau de sophistication remarquable, marqué par une recherche d'harmonie, de proportion et de fonctionnalité. Les architectes grecs, influencés par des principes mathématiques et philosophiques, (Victor, 1888) ont développé des ordres architecturaux (dorique, ionique, corinthien) qui structuraient leurs constructions.

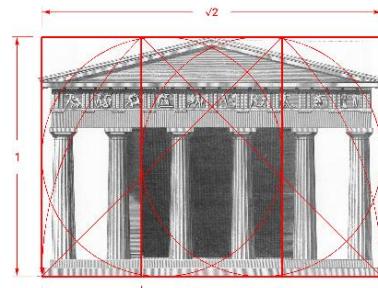


Figure 4 Andrea Palladio- Leoni Edition - Le temple d'Héphaïstos  
Source : <https://overtop.metrokini.com/classical-architecture-2/>

Les Romains, quant à eux, ont perfectionné ces techniques en intégrant des innovations telles que l'arc, la voûte et le béton, permettant la réalisation d'édifices grandioses comme le Colisée ou le Panthéon. Ces réalisations reflétaient non seulement une maîtrise technique avancée, mais aussi une volonté de glorifier la cité et l'Empire.

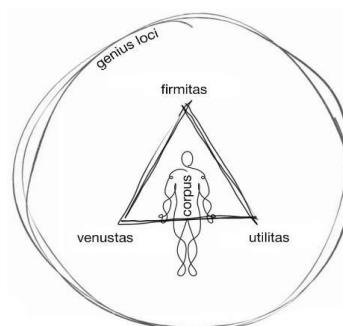


Figure 5 Variables de l'architecture contemporaine  
Source : <https://arquitectosartistas.canqn.org.ar/obra/variables-de-la-arquitectura-contemporanea/>

Le livre de Vitruve, "*De Architectura*", est un traité fondamental qui a eu un impact considérable sur l'architecture romaine et grecque, ainsi que sur l'architecture des époques ultérieures.

## **Impact de "De Architectura" sur l'architecture romain de l'époque**

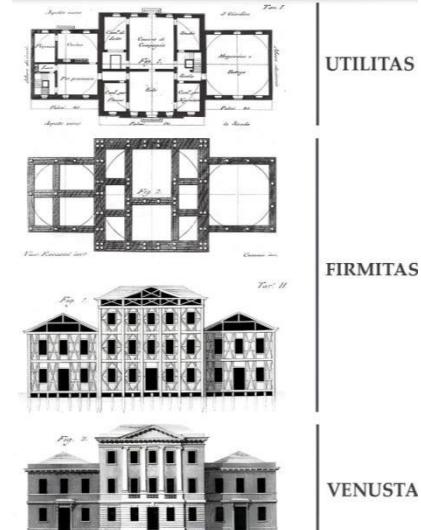
Vitruve a défini trois qualités essentielles pour un bâtiment :

- **firmitas** (solidité) se réfère à la solidité et à la durabilité d'un bâtiment. Un édifice doit être construit de manière à résister au temps, aux intempéries et à l'usure.
  - **Utilitas** (Utilité) concerne l'utilité et la fonctionnalité d'un bâtiment. Un édifice doit répondre aux besoins pour lesquels il est conçu.
  - **venustas** (beauté) se rapporte à la beauté et à l'esthétique d'un bâtiment. Un édifice doit être agréable à regarder et inspirer une émotion positive  
  - **Le Moyen Âge : l'architecture religieuse**

#### • Le Moyen Âge : l'architecture religieuse

La conception architecturale au Moyen Âge était caractérisée par une évolution stylistique marquée, passant de l'architecture préromane à l'architecture romane et enfin gothique. Les bâtiments religieux, comme les églises et cathédrales, suivaient souvent un plan en croix latine, inspiré des basiliques romaines. L'architecture romane se distingue par l'utilisation de voûtes en pierre, d'arcs plein cintre et de murs épais avec des fenêtres étroites, tandis que l'architecture gothique innove avec l'arc brisé et la voûte en clé d'ogive, permettant des structures plus hautes et plus lumineuses grâce aux vitraux.

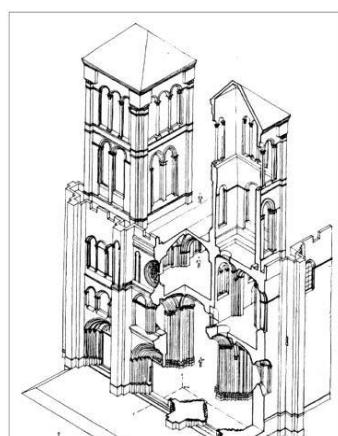
(Scott, 2003)



**Figure 6** Exemplification of the Vitruvian triad: *firmitas, utilitas, venustas*

*Source :*

*les outils usuels et gératifs de*



**Figure 7** Saint-Denis, abbatiale.  
Axonométrie du massif occidental de  
Suger

**Source :** <https://books.openedition.org/pup/5597>

### **II.2.1.2 Architecture islamique**

L'histoire de l'architecture islamique commence au VIIe siècle avec la naissance de l'islam et s'étend sur plus de mille ans, couvrant des régions allant de l'Espagne à l'Inde. Inspirée par les civilisations byzantine, perse et mésopotamienne, elle a créé un style unique, mélangeant innovation technique et beauté artistique. Les mosquées, comme celle de Cordoue ou de Kairouan, les palais somptueux comme l'Alhambra, et les écoles religieuses (madrasas) montrent comment cette architecture allie fonctionnalité, spiritualité et esthétique. Les architectes ont utilisé des dômes, des voûtes et des arcs de manière innovante, tout en décorant les bâtiments avec des motifs géométriques, des arabesques et des calligraphies. (Henri, 1993) Cette architecture, adaptée aux climats locaux et riche en symboles religieux, a influencé d'autres cultures et laisse un héritage impressionnant, comme le Taj Mahal en Inde.

**Figure 8** La mosquée Süleymaniye ou mosquée de Soliman (en turc Süleymaniye Camii), conçue par l'architecte Sinan pour le sultan Soliman le Magnifique et construite de 1550 à 1557

**Source :**

<https://thermolock.com/fr/media/blog/thermolock-5eme-procede>



### II.2.1.3 L'époque moderne : l'industrialisation et au-delà

L'industrialisation a apporté de nouveaux matériaux et des méthodes de construction innovantes, entraînant une révolution dans le processus de création architecturale. Les plans techniques ont gagné en précision et en uniformité.

Formation basée sur des données disponibles jusqu'en octobre 2023. L'époque du numérique

À l'heure actuelle, des outils digitaux comme la CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et le BIM (Modélisation de l'Information du Bâtiment) ont transformé radicalement la création architecturale. Désormais, les dessins sont effectués en 3D, offrant une visualisation et une planification plus précise.



**Figure 9** époque moderne et industrialisation

**Source :** Idiogram

## II.3 Les étapes de l'évolution technologique en architecture

L'architecture a toujours évolué avec les avancées technologiques, et chaque étape a apporté de nouveaux outils et méthodes qui ont changé la façon dont les architectes travaillent. Cette évolution ne s'est pas faite du jour au lendemain, mais plutôt petit à petit, en s'appuyant sur les progrès scientifiques et techniques. Quatre grandes étapes ont marqué cette transformation : la modularité, la conception assistée par ordinateur (CAO), le paramétrique, et enfin l'intelligence artificielle (IA). Chacune de ces étapes a permis aux architectes de repousser les limites de la conception et de la construction, en rendant les processus plus efficaces et créatifs. (Chaillou, 2020)

### 1930-1960 La Modularité

La modularité est une approche qui consiste à concevoir des bâtiments à partir de modules standardisés, permettant une construction plus rapide, économique et prévisible.

#### Origines

Cette idée a été inventé au Bauhaus par **Walter Gropius** dans les années 1920, avec le concept de Baukasten (boîte à outils modulaire). Richard Buckminster Fuller a poussé cette idée plus loin avec sa Dymaxion House, une maison modulaire extrême.

Le Corbusier : Avec son Modulor (1945), Le Corbusier a appliqué la modularité à l'échelle humaine, créant un système de proportions basé sur les dimensions du corps humain. Cela a influencé des projets comme l'Unité d'Habitation de Marseille. (Corbusier, 1983)

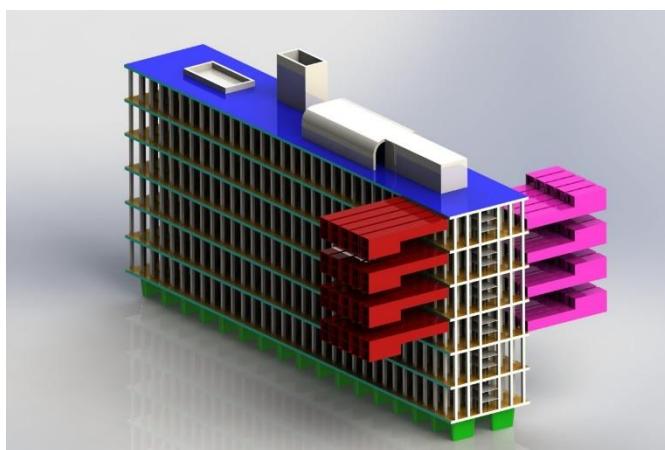


Figure 11 Rendu 3D de la Marquette Cité radieuse (appartements sortis)

Source: clementauvin.com

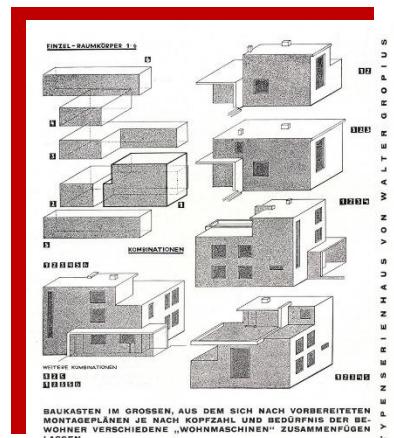


Figure 10 Principe des maisons types de Walter Gropius

Source :

<https://www.modularart.ch/fr/jeu-de-construction-en-grand/>

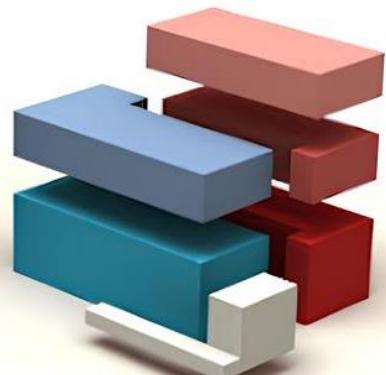


Figure 12 Modules qui composent la maison Auerbach

Source: bauhauseso.blogspot.com

## 1960-1990

### CAO

Elle a permis d'utiliser des ordinateurs pour dessiner et modéliser des projets d'architecture. Cela a rendu les plans plus précis et a amélioré la collaboration entre les différents professionnels impliqués dans la construction.

#### Origines

Le premier logiciel de CAO, **Pronto**, a été développé en 1959 par **Patrick Hanratty**.

Christopher Alexander a ensuite théorisé l'utilisation des ordinateurs pour la conception architecturale dans ses ouvrages "Notes on the Synthesis of Form" (1964) et "A Pattern Language" (1977).

Architecture Machine Group (**AMG**) : Au MIT, Nicholas Negroponte et son équipe ont exploré comment les ordinateurs pouvaient améliorer la conception architecturale, notamment avec des projets comme **URBAN II** et **URBAN V**.



Figure 13 Patrick HANRATTY – Pronto  
Source:

[www.digitalengineering247.com](http://www.digitalengineering247.com)



Figure 15 La superposition d'URBAN 5  
et le tube cathodique IBM 2250 modèle  
1 utilisé pour URBAN 5  
source: openarchitectures.com



Figure 14 Le projet SEEK, Architecture Machine Groupe 1969-1970

Source : [https://www.researchgate.net/figure/Le-projet-SEEK-Architecture-Machine-Group-MIT-1969-1970\\_fig1\\_367990198](https://www.researchgate.net/figure/Le-projet-SEEK-Architecture-Machine-Group-MIT-1969-1970_fig1_367990198)

# 1990-2000

## Paramétrisme

C'est une approche qui utilise des paramètres et des règles pour générer des formes architecturales complexes. Chaque élément du design est lié à des variables qui peuvent être ajustées pour produire des variations.

### Origines

Luigi Moretti a été l'un des premiers à explorer cette approche avec son projet Stadium N (1960), où il a utilisé 19 paramètres pour définir la forme d'un stade.

- En 1963, Ivan Sutherland a créé SketchPad, un des premiers logiciels de CAO paramétrique, permettant de manipuler des formes géométriques à l'aide de contraintes.
- **Zaha Hadid** : L'architecte Zaha Hadid a été une pionnière du paramétrique, utilisant des logiciels comme **Grasshopper** pour créer des designs organiques et fluides.

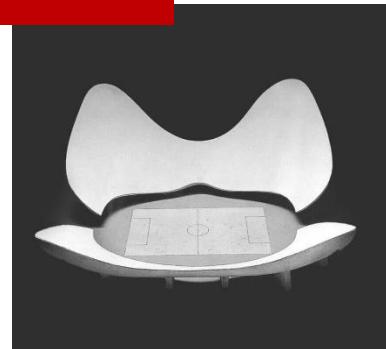


Figure 17 Maquette de stade conçue selon des courbes d'égalité visuelle, présentée par Luigi Moretti à la Triennale de Milan,  
Source : [www.giuseppegallo.design](http://www.giuseppegallo.design)

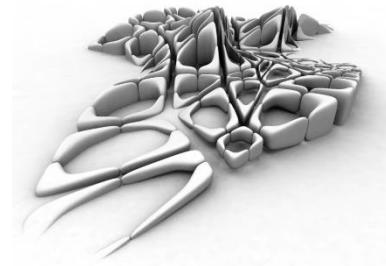


Figure 16 Rendu ZAHA Hadid  
Source :  
[https://issuu.com/potnemo\\_adato/docs/architecture\\_2bpainting\\_digital/s/11272890](https://issuu.com/potnemo_adato/docs/architecture_2bpainting_digital/s/11272890)



Figure 18 Ivan Sutherland's 1963 Sketchpad  
Source : [xximagazine.com](http://xximagazine.com)



**Sketchpad** a été l'un des premiers systèmes de conception à utiliser une interface utilisateur graphique

# 1990 à nos jour IA en architecture

L'IA utilise des algorithmes pour apprendre à partir de donner essayer de trouver des solutions architecturales. Elle permet une approche plus statistique et moins déterministe que les méthodes précédentes.

## Origines

Le mot intelligence artificiel a été inventé en 1956 par John McCarthy dans la conférence de Dartmouth. Dans les années 1980, les systèmes experts et les moteurs d'inférence ont marqué une première étape dans l'application de l'IA à la conception.

Ces dernières années, la concurrence mondiale en intelligence artificielle (IA) s'est intensifiée, avec des pays et des entreprises rivalisant pour dominer ce secteur stratégique. Les États-Unis et la Chine restent les principaux acteurs, investissant massivement dans la recherche, le développement et l'application de l'IA. Cependant, l'Europe, le Canada et d'autres nations émergentes cherchent également à se positionner, en misant sur l'innovation et la régulation éthique.

Chiffre d'affaires généré par l'intelligence artificielle dans le monde, en milliards de dollars \*

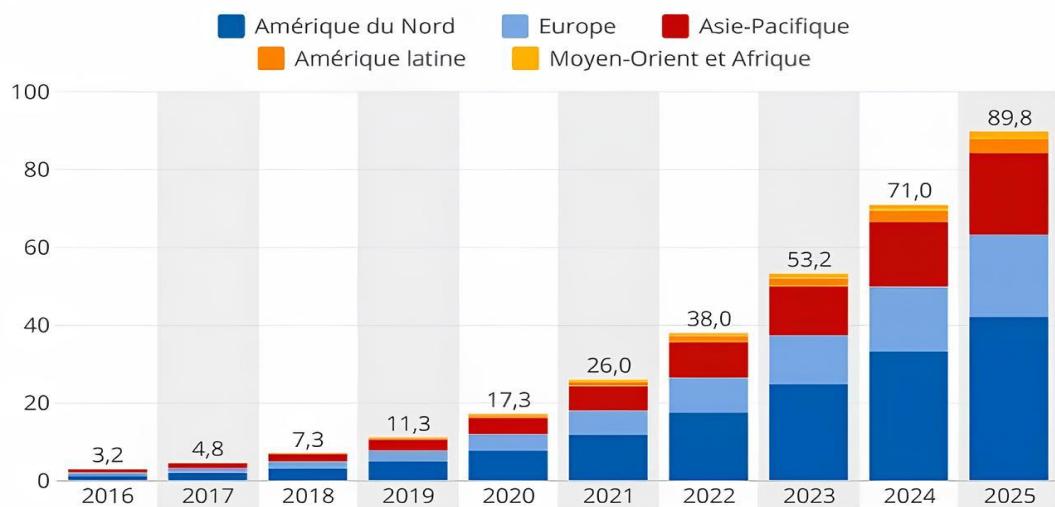


Figure 19 L'ia, un marché qui vaut des milliards Source: www.journaldunet.com

## Conclusion du chapitre

L'étude montre comment les avancées technologiques, de la CAO à l'IA, ont transformé la pratique architecturale. Ces évolutions soulignent l'importance d'intégrer des outils innovants pour répondre aux défis contemporains.

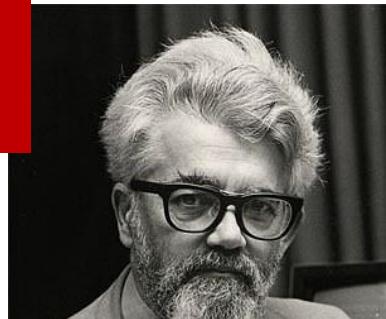


Figure 21 John McCarthy

Source: www.wired.com

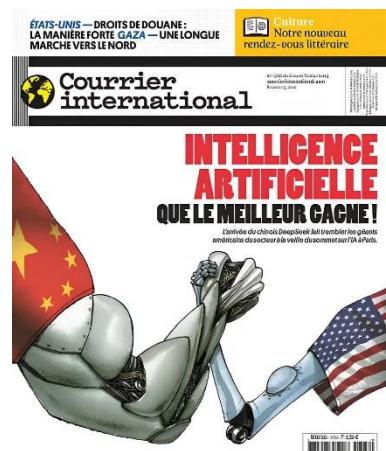


Figure 20 Intelligence artificielle : que le meilleur gagne !

Source : courrierinternational

# 02

Chapitre



## III. Chapitre 02 : L'IA, Révolution Technologique et Architecturale

### Introduction

Ce chapitre examine l'IA sous ses aspects historiques, techniques et applicatifs. Il aborde ses modèles (Machine Learning, Deep Learning), ses impacts environnementaux, et son rôle dans l'architecture durable, en présentant des outils comme Autodesk Forma.

#### III.1 Contexte historique : l'apparition de l'intelligence artificielle

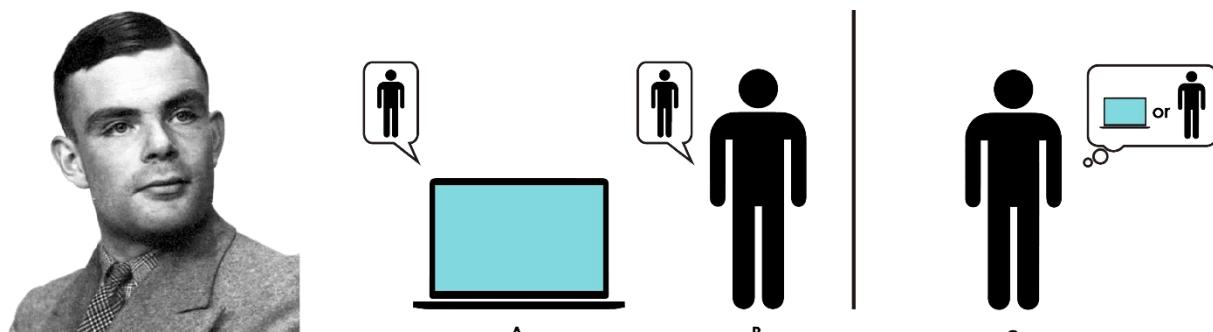
##### III.1.1 Origine de l'IA

L'histoire de l'intelligence artificielle (IA) commence il y a plusieurs siècles avec les travaux et recherches des philosophes comme **Leibniz** et **Descartes**, qui ont essayé de comprendre comment fonctionne la pensée humaine. Leurs travaux ont permis de mieux cerner les mécanismes de la logique et du raisonnement. Cela a permis de poser les bases pour étudier l'intelligence de manière plus organisée.

Ce n'est qu'au 20 ème siècle que l'IA est devenue une discipline scientifique à part entière.

En **1943**, quand deux chercheurs, **Walter Pitts** et **Warren McCulloch**, ont eu l'idée de créer un modèle de réseaux de neurones inspiré du cerveau humain. Ils ont montré comment des "neurones artificiels" pouvaient faire des calculs, comme le fait notre cerveau. Cette idée est devenue la base de l'IA moderne (Leach, 2022) (Chaillou, 2020)

En **1950**, **Alan Turing**, un scientifique célèbre, a posé une question importante : "*Est-ce qu'une machine peut penser ?*" Pour répondre à cette question, il a inventé le "Test de Turing". (Jean-Yves & Alan, 1999) L'idée est simple : une machine essaie de tromper un humain en lui faisant croire qu'elle est aussi un humain, grâce à une conversation écrite. Par exemple, la machine pourrait répondre à des questions sur la poésie ou faire des erreurs de calcul exprès pour paraître plus humaine.



Alan Turing

Figure 22 Le test de Turing (1950)  
Source: [www.pngegg.com](http://www.pngegg.com)

Dans les **années 1950**, les chercheurs ont exploré deux grandes idées : d'un côté, comment les machines peuvent apprendre et s'adapter (comportement adaptatif), et de l'autre, comment elles peuvent raisonner et résoudre des problèmes (pensée logique). Ces deux approches ont permis de poser les bases de l'IA.

Mais en **1969**, les chercheurs **Seymour Papert** et **Marvin Minsky** ont montré que les machines avaient des limites. Dans leur livre « *Perceptrons* », ils ont expliqué que les réseaux de neurones simples ne pouvaient pas résoudre des problèmes complexes. Cela a découragé les financeurs, et les recherches sur l'IA ont ralenti pendant un temps. Cette période est appelée "l'hiver de l'IA"

(Leach, 2022)

Heureusement, dans les **années 1990**, l'IA a fait un grand retour. Grâce à internet et à des ordinateurs plus puissants, les chercheurs ont pu utiliser de grandes quantités de données (le "**Big Data**") pour entraîner des systèmes d'IA. Cela a permis de grandes avancées, notamment dans la reconnaissance d'images et le traitement du langage.

Un événement marquant a eu lieu en **1997**, quand l'ordinateur **Deep Blue**, créé par **IBM**, a battu le champion du monde d'échecs Garry Kasparov. Cela a montré au monde que les machines pouvaient surpasser les humains dans des tâches complexes. Après cela, des projets comme **ImageNet**, Human Connectome Project et **OpenAI** ont vu le jour. Par exemple, ImageNet a organisé un concours pour améliorer la reconnaissance d'images, ce qui a beaucoup aidé à faire progresser l'IA.



Figure 23 Victoire de Deep Blue sur Kasparov (1997)

Source: [www.tomshardware.fr](http://www.tomshardware.fr)

Aujourd'hui, l'IA est partout : dans les téléphones, voitures, et même dans les services utiliser en ligne. Elle continue d'évoluer rapidement, grâce à des technologies de plus en plus avancées et à des collaborations entre chercheurs du monde entier. Ce qui a commencé comme une simple idée en 1943 est devenu une révolution qui change le quotidien des gens.

### III.1.2 Les hivers de l'IA

Elles désignent les moments où les gens ont perdu confiance dans les capacités de l'intelligence artificielle. En conséquence, les investisseurs et les gouvernements ont réduit leur soutien financier.

Le premier hiver de l'IA, vers 1974, a été déclenché par deux échecs majeurs. D'abord, les promesses de traduction automatique, financées par le gouvernement américain pendant la Guerre froide, n'ont pas été tenues, conduisant à des erreurs graves. Ensuite, le livre *Perceptrons* de **Marvin Minsky** et **Seymour Papert** a critiqué les limites des réseaux de neurones, ce qui a discrédité l'approche connexionniste et favorisé l'IA symbolique.

Un deuxième hiver de l'IA a eu lieu à la fin des années 1980, avec l'effondrement du marché des machines **LISP** et un changement de politique de financement de la **DARPA**. Malgré ces périodes de doute, la recherche en IA a continué à progresser discrètement, intégrant des applications dans de nombreux domaines, comme les **voitures**, les avions ou les jeux vidéo. Cependant, ces avancées restent souvent invisibles pour le public, qui ne prend conscience du potentiel de l'IA qu'à travers des événements spectaculaires. (Leach, 2022)

## III.2 Définition

L'intelligence artificielle (IA) est un programme qui imite l'intelligence humaine à travers des algorithmes. Son développement a été accéléré par le **Big data** depuis 2010.

Selon John McCarthy, pionnier du domaine, c'est "**la science et l'ingénierie de la fabrication de machines intelligentes**". L'IA vise à créer des systèmes capables de réaliser des tâches nécessitant normalement l'intelligence humaine. Pour le Parlement européen, l'intelligence artificielle représente tout outil utilisé

par une machine afin de « reproduire des comportements liés aux humains, tels que le raisonnement, la planification et la créativité ». (CNIL, 2022)

## III.3 Fonctionnement

L'intelligence artificielle (IA) fonctionne en utilisant des programmes complexes qui analysent de grandes quantités d'informations pour imiter les actions humaines. Elle utilise des techniques comme **le machine learning** (apprentissage automatique) et **le deep learning** (apprentissage profond) pour s'améliorer sans cesse. Grâce à des réseaux de neurones artificiels, l'IA apprend à faire des liens entre les informations qu'elle reçoit et les résultats qu'elle doit produire, en ajustant ses paramètres pour devenir plus précise. L'entraînement d'une IA commence par la collecte de vastes ensembles de données. Ensuite, selon le type de programme utilisé, l'IA identifie des motifs dans ces données. Les erreurs sont analysées, et les paramètres internes sont ajustés pour réduire ces erreurs, ce qui permet à l'IA d'améliorer ses prédictions au fil du temps. (David, 2024)

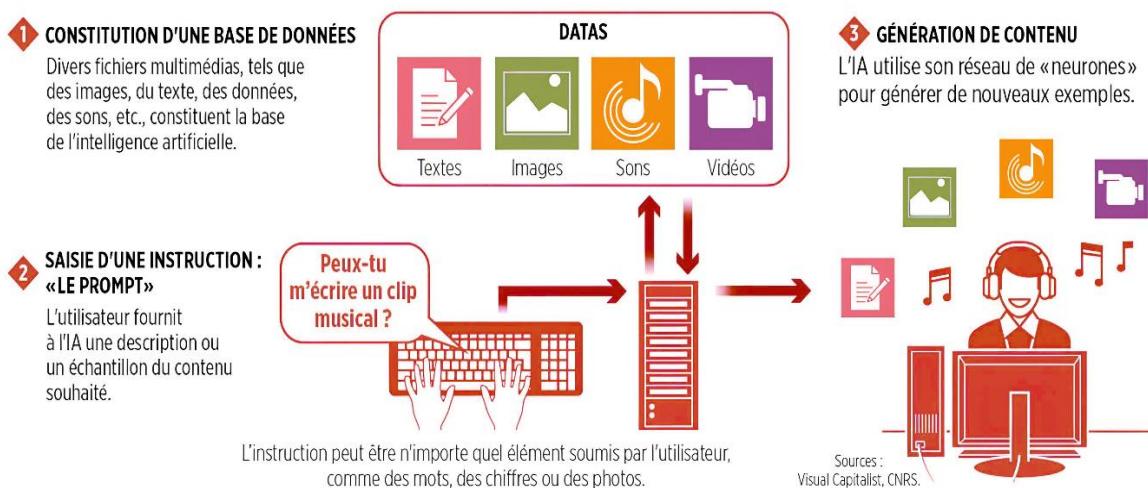


Figure 24 schéma fonctionnement d'une IA  
Source : article "L'IA générative et la révolution à venir dans la santé"

## III.4 Modèles d'IA

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine en pleine expansion qui cherche à imiter l'intelligence humaine à travers des systèmes informatiques. Elle englobe une variété de modèles et de techniques, parmi lesquels le Machine Learning (ML), le Deep Learning (DL), (Choudhary, 2024) (Leach, 2022) les réseaux neuronaux et les grands modèles de langage (LL M) (Uysal, Karagul, & Uysal, 2025)

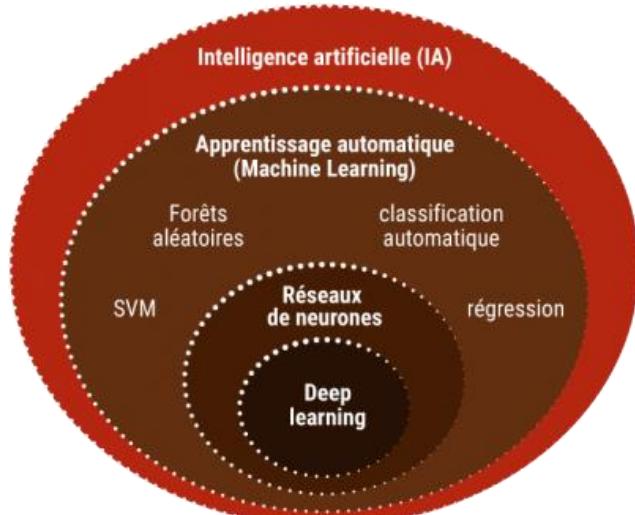


Figure 25 les modèles d'IA

Source : perso.univ-lyon1.fr

### III.4.1 Machine Learning (ML)

Elle permet aux ordinateurs d'apprendre à partir de données et de s'améliorer sans avoir besoin d'être programmés pour chaque tâche spécifique. Il utilise des algorithmes pour repérer des motifs dans les données et s'en servir pour faire des prédictions ou prendre des décisions.

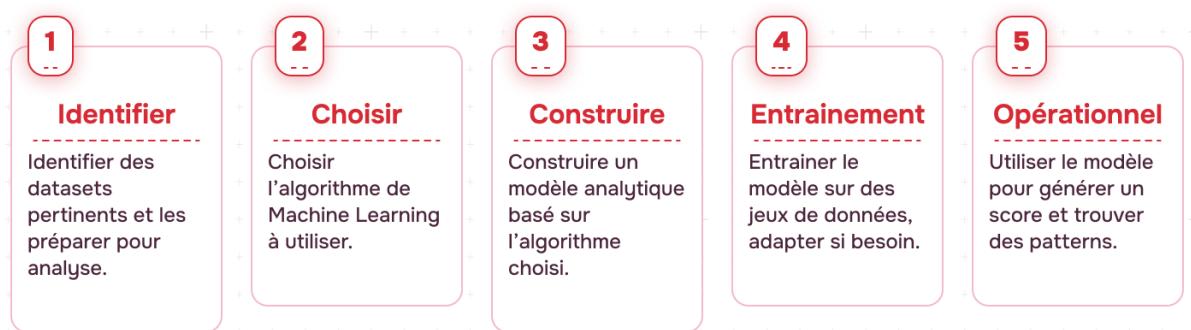


Figure 26 Schéma d'un process de Machine Learning

Source: www.data-bird.com

### III.4.2 Deep Learning (DL) :

Une version plus avancée du Machine Learning. Il utilise des réseaux de neurones complexes avec plusieurs couches pour analyser de grandes quantités de données. Cette technologie est essentielle pour des applications comme la reconnaissance d'images (computer vision) ou le traitement du langage naturel (**Natural Language Processing, NLP**).



Figure 27 Schéma d'un process de Deep Learning

Source: www.data-bird.com

### III.4.3 Réseaux de Neurones :

Les réseaux de neurones artificiels sont la base du **Deep Learning**. Inspirés du fonctionnement du cerveau humain, ils sont composés de plusieurs couches de neurones connectés qui traitent les données étape par étape. Ces réseaux sont très efficaces pour reconnaître des motifs complexes, comme dans les images ou les sons.

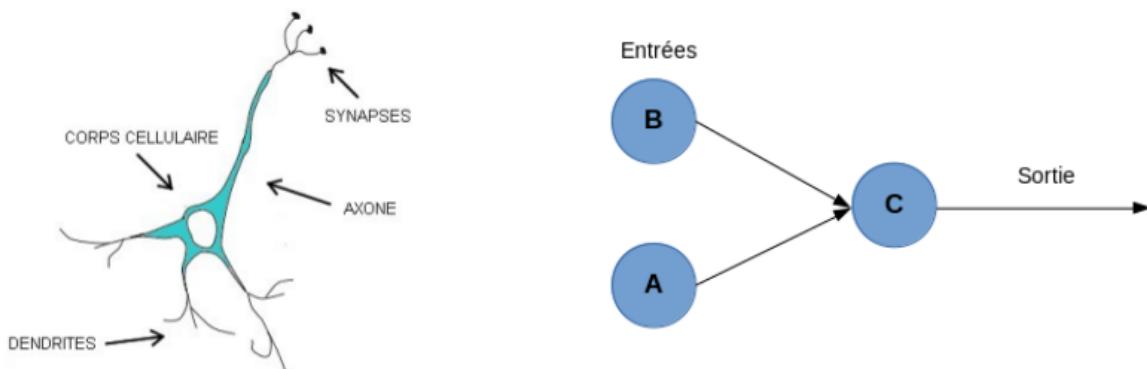


Figure 28 À gauche le schéma d'un neurone biologique et à droite le schéma du neurone formel de 1943.  
Source : [www.natural-solutions.eu](http://www.natural-solutions.eu)

### III.4.4 LLM (Large Language Models) :

Sont des réseaux de neurones spécialisés dans le traitement du texte. Ils peuvent comprendre et générer du langage naturel de manière très fluide. Des exemples connus sont **GPT** et **BERT**, utilisés pour des tâches comme la rédaction de texte ou la traduction automatique.

## III.5 Types d'IA

L'intelligence artificielle (IA) peut être classée en trois catégories principales : l'IA faible, l'IA forte et l'IA générale. (Nick, 2014) Chacune de ces catégories présente des caractéristiques distinctes et des niveaux de capacité différents.

**IA Générale (ou Profonde) :** Capable de réaliser n'importe quelle tâche cognitive comme un humain. Certains scientifiques s'interrogent sur **GPT-4** comme une première forme d'IA générale.

**IA Forte (ou Super intelligence) :** Montre des signes d'une conscience propre et de connaissances philosophiques. Les chercheurs estiment qu'elle est impossible à créer actuellement.

**IA Faible (ou Étroite) :**

Également connue sous le nom d'IA étroite, est conçue pour effectuer des tâches spécifiques avec une performance élevée. Ces systèmes ne possèdent pas de compréhension générale ni de conscience de soi. Ils sont programmés pour réaliser une seule tâche, comme la reconnaissance d'images, la traduction automatique ou les assistants vocaux.

## III.6 Applications de l'IA par Secteur

- **Santé** : Diagnostics médicaux précis, personnalisation des traitements, gestion des hôpitaux.
- **Finance** : Analyse prédictive des marchés, gestion des risques, détection de fraudes.
- **Commerce et E-commerce** : Recommandations personnalisées, optimisation des chaînes d'approvisionnement, analyse des comportements d'achat, **chatbots**.
- **Transport et Logistique** : Optimisation des itinéraires, réduction des coûts, automatisation des véhicules autonomes.
- **Industrie Manufacturière** : Automatisation des chaînes de production, maintenance prédictive, amélioration de la qualité.
- **Marketing et Service Client** : Ciblage publicitaire, analyse des consommateurs, assistants virtuels.
- **Sécurité et Défense** : Surveillance intelligente, détection d'intrusions, gestion de drones autonomes.
- **Éducation** : Apprentissage personnalisé, adaptation des méthodes d'enseignement.
- **Ressources Humaines** : Recrutement, présélection de candidats, formation continue.
- **Environnement et Agriculture** : Optimisation de l'utilisation des ressources naturelles, agriculture de précision.

## III.7 Les impacts de l'IA sur l'environnement

Avec le développement rapide de l'intelligence artificielle (IA), notamment l'IA générative et les grands modèles de langage (LLM), la question de son impact sur l'environnement fait l'objet de nombreuses études (Chagny, 2025). L'IA est au cœur d'une nouvelle révolution technologique, capable de traiter des informations à une échelle et une performance jamais vues auparavant.

D'un côté, l'IA est vue comme une technologie clé pour la transition écologique. Elle pourrait aider à résoudre des problèmes complexes, améliorer les modes de production et favoriser un (STRUBELL, GANESH, & McCALLUM, 2020)développement durable.

Mais d'un autre côté, des analyses montrent que l'IA a aussi un impact environnemental important, comme les révolutions technologiques passées (machine à vapeur, électricité). Certains remettent en question l'idée d'une IA uniquement bénéfique pour la planète.

### III.7.1 Les impacts négatifs attendus

L'IA, bien que présentée comme un outil clé pour la transition écologique, a paradoxalement un lourd impact environnemental : le numérique représente déjà 4% des émissions mondiales de gaz à effet de serre (autant que l'aviation) (BRILLAND, FANGEAT, MEYER, & WELLHOFF, 2025), et l'**ADEME** prévoit un triplement de ces émissions d'ici 2050 si rien n'est fait. La formation des modèles d'IA générative consomme énormément d'énergie (jusqu'à 100 tonnes de CO<sub>2</sub> pour un seul modèle) (STRUBELL, GANESH, & McCALLUM, 2020), tandis que la fabrication des équipements nécessaires épure les métaux rares et génère des déchets électroniques peu recyclés. Les centres de données, gourmands en électricité et en eau (leur consommation pourrait égaler la moitié des besoins du Royaume-Uni d'ici 2027), posent un défi majeur en période de stress hydrique. Face à cette urgence, experts et rapports appellent au développement d'IA "frugales" pour limiter ces impacts croissants.

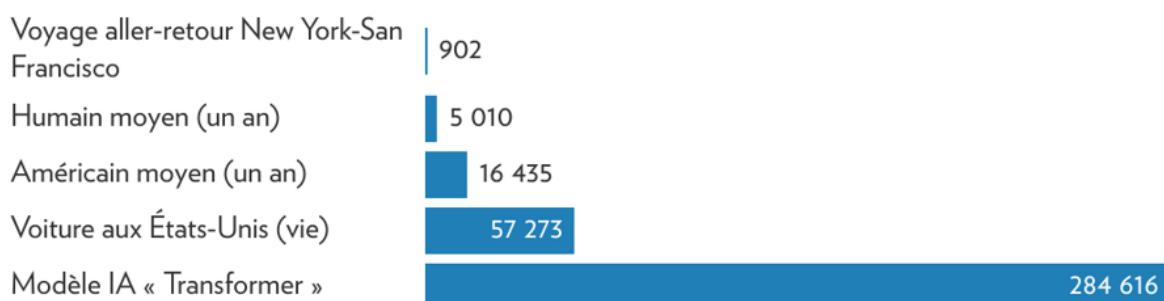
### III.7.2 L'empreinte environnementale de l'IA

L'IA a un impact environnemental majeur, divisé en deux phases : l'entraînement (apprentissage des modèles) et l'usage (inférence), cette dernière devenant la plus polluante avec l'essor de l'IA générative, représentant jusqu'à deux tiers de son empreinte.

Les **data centers**, consommant autant d'électricité que la France en un an, et la fabrication des équipements (serveurs, terminaux), responsable de 4% des émissions mondiales de GES (en voie de triplement), en sont les principaux contributeurs. (Chagny, 2025) Cette fabrication repose sur l'extraction de terres rares, générant pollution des sols, de l'eau et conditions de travail dangereuses, tandis que le fonctionnement des centres de données exige d'énormes quantités d'énergie et d'eau pour le refroidissement. Ainsi, loin d'être immatérielle, l'IA pèse lourdement sur les ressources naturelles et les écosystèmes à travers son cycle de vie complet.

## Empreintes écologiques

### En équivalent CO<sub>2</sub> (kg)



Source : *Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP*,  
University of Massachusetts Amherst



Figure 29 empreinte écologique

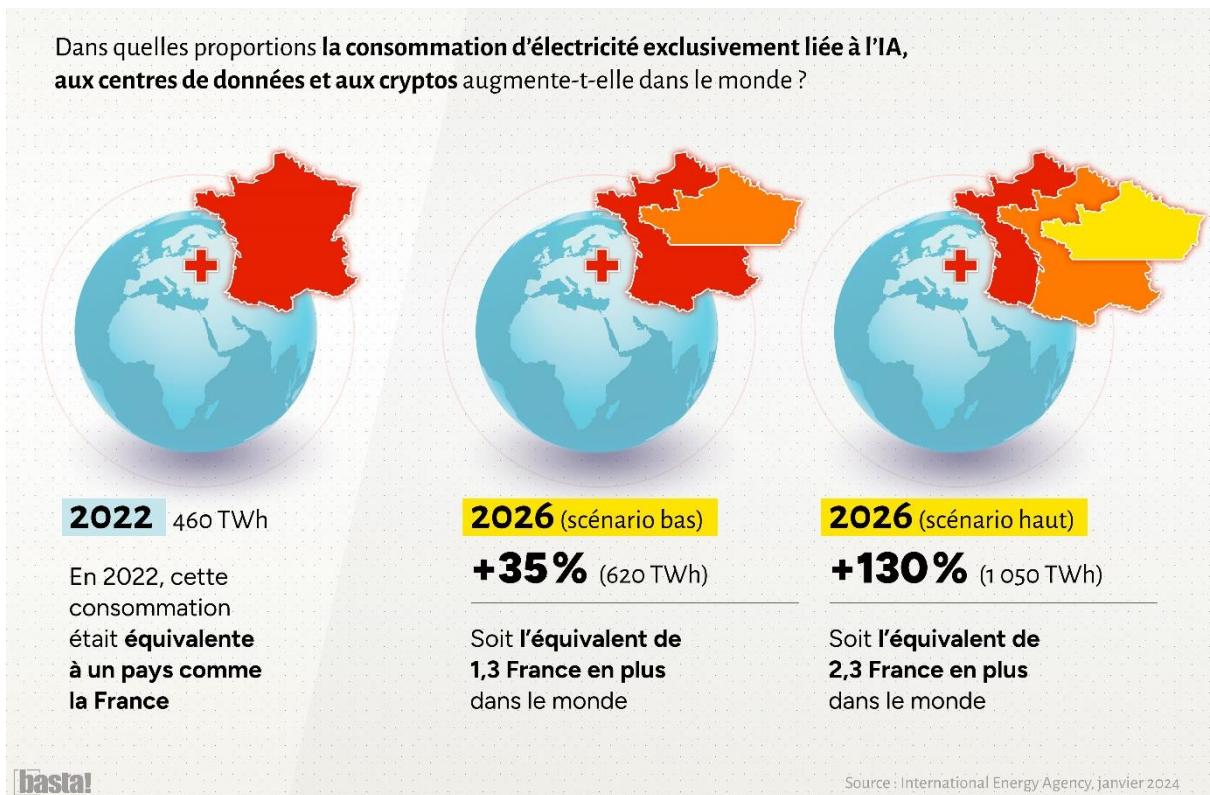
Source : <https://www.lapresse.ca/affaires/economie/2023-06-03/intelligence-artificielle/un-impact-environnemental-monstre.php>

### III.7.3 Une explosion de la consommation d'électricité

D'après l'Agence internationale de l'énergie en France, les centres de données utilisent actuellement 1 % de l'électricité mondiale. Mais avec l'essor de l'IA et des crypto monnaies, cette consommation pourrait exploser.

En 2022, ces centres ont déjà consommé 460 TWh, soit autant que toute la France ! Et d'ici 2026, leur demande en électricité pourrait grimper de 35 % à 130 %, ce qui équivaut à ajouter la consommation d'un pays comme la Suède... ou même l'Allemagne.

Une étude de l'**ONG Beyond Fossil Fuels** alerte encore plus : dans l'UE, d'ici 2030, les centres de données pourraient émettre 121 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> en plus – presque autant que toutes les centrales à gaz de l'Italie, de l'Allemagne et du Royaume-Uni réunies aujourd'hui.



**Figure 30** IA data center et cryptomonnaies font exploser la consommation mondiale de l'électricité  
Source : International Energy Agency, Janvier 2024

## III.8 Risques et Opportunités

L'intelligence artificielle (IA) est une technologie à forte croissance qui a un impact de plus en plus significatif sur la vie quotidienne. Elle présente des chances considérables, tout en soulevant aussi d'importants enjeux, particulièrement en ce qui concerne les droits de l'homme, la sécurité et l'éthique.

### III.8.1 Les avantages de l'IA

- L'IA aide à éviter les erreurs humaines, surtout dans des tâches répétitives comme la saisie de données ou les contrôles de qualité. Elle analyse aussi de grandes quantités de données pour repérer des problèmes que les humains pourraient manquer.
- Les entreprises et les institutions utilisent l'IA pour gérer de grandes quantités de données, comme la détection des fraudes, et la prise de décisions rapides. L'IA apprend vite et surpassé souvent les capacités humaines dans ce domaine.
- Innovation et créativité : L'IA peut générer de nouvelles idées, résoudre des problèmes complexes, et même créer de l'art ou des divertissements innovants.
- L'IA est utilisée dans la santé pour diagnostiquer des maladies, simuler des chirurgies, ou aider les patients en santé mentale. Elle peut aussi créer des produits et services adaptés à nos besoins.

### III.8.2 Les risques et défis associés à l'IA

- Créer et maintenir une IA coûte cher, car c'est une technologie complexe. Bien qu'il existe des modèles d'IA prêts à l'emploi, leur adaptation aux besoins spécifiques d'une entreprise reste coûteuse.
- Les machines ne peuvent pas penser par elles-mêmes ou prendre des décisions personnelles. Elles suivent uniquement ce qu'elle est leur programmé et peuvent échouer face à des situations nouvelles ou imprévues.
- Il est souvent difficile de comprendre comment une IA prend ses décisions, surtout dans des domaines critiques comme la santé ou la justice. Parfois, l'IA peut donner des réponses fausses ou trompeuses appelées "**hallucinations**", ce qui nécessite une vigilance humaine.
- Contrairement aux humains, l'IA ne s'améliore pas avec l'expérience. Elle a besoin de nouvelles données et d'un apprentissage constant pour rester performante.
- L'IA manque d'imagination et d'émotions, ce qui limite sa capacité à être vraiment créative. Elle peut imiter, mais pas innover comme un humain.
- L'automatisation par l'IA risque de supprimer des emplois, surtout dans les secteurs où les tâches sont répétitives. Cela peut créer des problèmes sociaux si des politiques de reconversion ne sont pas mises en place.
- L'IA pose des questions sur l'utilisation des données, la surveillance, et le rôle de l'humain dans la société. Son utilisation dans des domaines sensibles, comme la sécurité, peut entraîner des tromperies.

## III.9 L'IA en architecture

L'emploi de l'intelligence artificielle en architecture consiste à utiliser des technologies informatiques (logiciels – plateforme online – outils) pour aider les architectes dans les différentes étapes de conception architectural. Elle a la capacité d'examiner des données, de produire des idées de conception, d'optimiser des plans et même de réaliser des images réalistes de projets. Elle ne substitue pas aux architectes, mais elle les soutient en automatisant des tâches répétitives et en proposant de nouvelles idées de conception. (Chaillou, 2020)

Les débuts de l'IA en architecture remontent aux années 1960, avec l'apparition des premiers systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO) et parmi les pères fondateurs on cite **Patrick J. Hanratty** et **Ivan Sutherland**. Le premier développe **PRONTO** (Program for Numerical Tooling Operations) Le second, propose le **Sketchpad** au cours de sa thèse de doctorat au MIT.

Dans les années 1980 et 1990, les systèmes experts, basés sur des règles, ont émergé pour aider à des tâches comme l'évaluation des designs, le choix des matériaux et la conformité aux normes

En 1982 la première version d'**AutoCAD** est lancée par Autodesk, c'est un événement majeur dans l'histoire de CAO en architecture.

À la fin du 20e siècle, les avancées en réseaux neuronaux et en apprentissage automatique ont permis aux ordinateurs d'apprendre à partir de données (auto développement), de repérer des modèles et de créer des solutions de conception tout seuls. Des logiciels comme **Grasshopper** et **Rhino** ont préparé le terrain pour des outils plus évolués, utilisant l'IA pour analyser des sites et améliorer le processus de conception architectural. Aujourd'hui, le **Deep Learning**, une forme d'apprentissage automatique, permet de tirer des informations complexes à partir de données brutes, offrant de nouvelles possibilités pour l'architecture.

### III.9.1 Exemple d'application d'IA en architecture

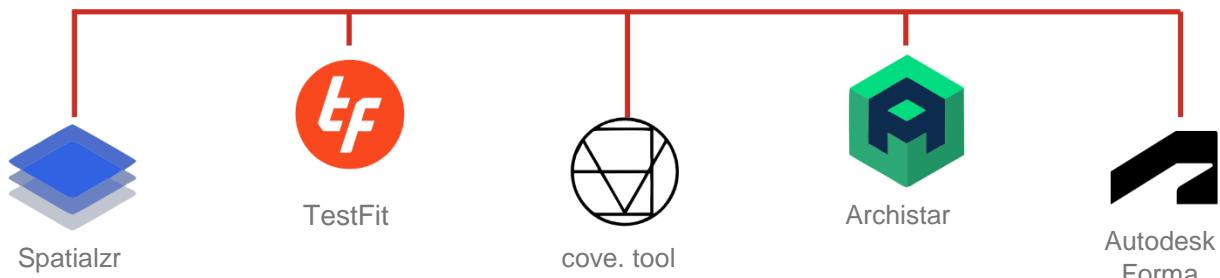
L'IA sert à imaginer, concevoir et évaluer des projets. Elle permet de créer des plans détaillés, des images (pour visualiser des idées ou faire des rendus), et d'analyser ou simuler des bâtiments. Elle aide aussi à gérer et partager des données pour améliorer la performance des constructions ou des chantiers. (Marsault, 2024)

Usage dominant

- Générer des plans de maison en quelques secondes à partir de critères simples (nombre de pièces, taille, style).
- Analyse l'ensoleillement, la ventilation et les matériaux pour proposer des bâtiments moins gourmands en énergie.
- L'IA propose des aménagements sur mesure en fonction des habitudes des habitants
- Génération de façades selon les prompts désiré par le concepteur

## III.9.2 Différents outils IA selon la catégorie

### III.9.2.1 Analyse de site



#### Spatialzr

- Reconnaissance automatique des plans (à partir de croquis, PDF, images).
- Génération de solutions d'aménagement optimisées (bureaux, logements, espaces publics).
- Conversion de documents 2D en modèles 3D exploitables.

#### Tarification

Payant (199€ /mois SIG immobilier et 849€/mois accès libre).

Essai gratuit disponible (durée limitée).

Site officiel : <https://spatialzr.umso.co/fr>

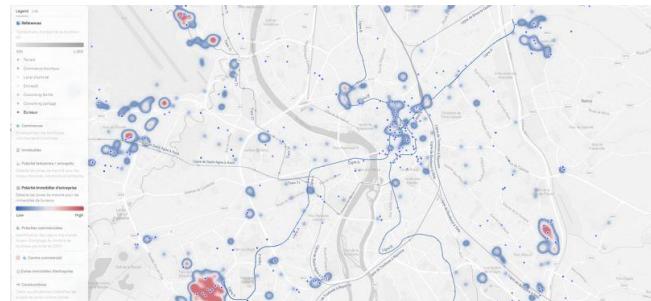


Figure 31 interface Spatialzr

Source :

[https://www.linkedin.com/posts/spatialzr\\_immobilierdentreprise-investissementimmobilier-activity-7178425622698897408-ImJb/?originalSubdomain=fr](https://www.linkedin.com/posts/spatialzr_immobilierdentreprise-investissementimmobilier-activity-7178425622698897408-ImJb/?originalSubdomain=fr)

#### Testfit

- Génération spécialisé en planification immobilière et architecturale
- Automatisation de la conception des plans, l'optimisation des espaces et les études de faisabilité
- L'optimisation des esquisses préliminaires"

#### Tarification

Payant (100 \$ / mois urbaniste

250 \$ / mois cartes de données

À partir de 8 000 \$ / an pour la conception générative)

Version d'essai gratuite disponible

Site officiel : <https://www.testfit.io>



Figure 32 interface Testfit

Source : <https://www.bim42.com/2018/05/testfit-and-automated-modelling>

## Coov tool

- Pilotage de projets immobiliers/architecturaux
- Supervision des tâches, échéances et budgets via un tableau de bord intelligent
- **Tarification**

Abonnements payants pour un accès complet (mensuel/annuel)

Site officiel : <https://www.coovtool.com>

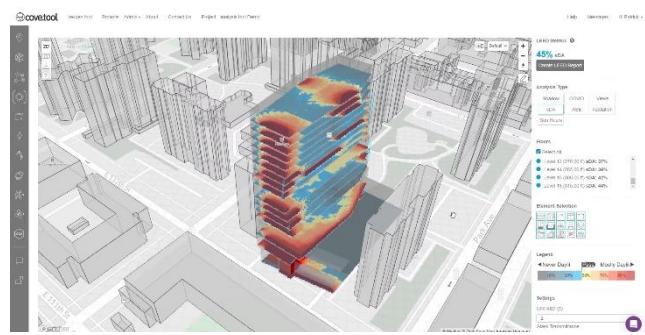


Figure 33 interface coov tool

Source: <https://download.archsupply.com/get/download-coov-tool-revit/>

## Archistar

- Analyse urbaine et la conception architecturale
- Génération automatique de solutions de conception basées sur les contraintes du site
- Analyse de faisabilité instantanée (règlements d'urbanisme, zonage, etc.)

### Tarification

Essai gratuit (limité en fonctionnalités)

Abonnement payant (95 \$/mois abonnement basique – 345 \$ accès professionnelle

Site officiel : <https://www.archistar.ai>

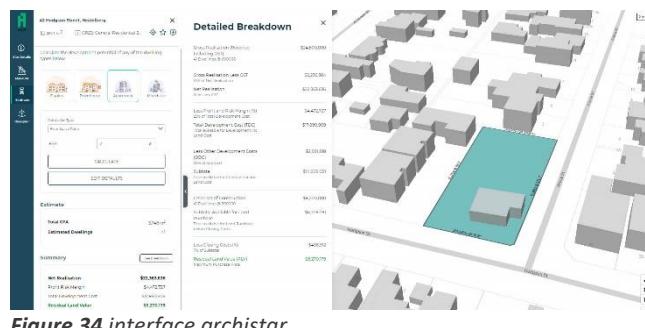
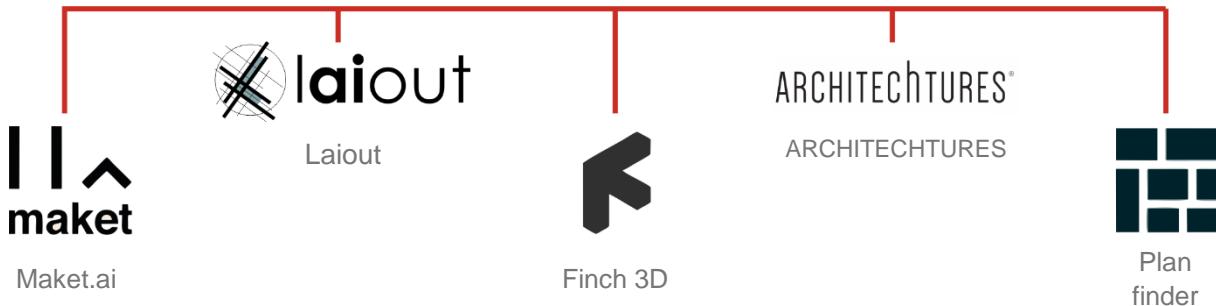


Figure 34 interface archistar

Source : <https://www.archistar.ai/for-property-developers-legacy/>

### III.9.2.2 Génération de plan



#### maket.ai

- Création instantanée de plans résidentiels personnalisés grâce à l'IA.
- Travail collaboratif avec des équipes via une intégration fluide avec d'autres logiciels.
- Rendus détaillés des projets pour une meilleure compréhension avant construction.
- 

#### Tarification

Plan Basic (Gratuit) : Jusqu'à 3 projets. 5 crédits de conception.

Plan Premium (288 USD/an) : Projets et crédits illimités. Images haute résolution.

Site officiel : [www.maket.ai](http://www.maket.ai)

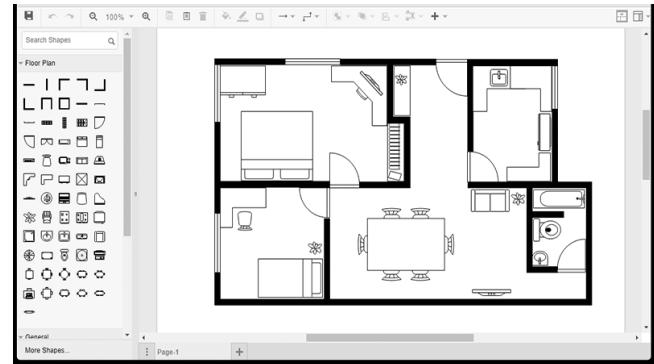


Figure 35 interface maket

Source : <https://listaria.com/make-ai-que-es-como-funciona-caracteristicas-beneficios-y-precios/>

#### Laiout

- Creation des plans d'étage architecturaux en quelques clics seulement.
- Maximisation express des performances du bâti
- Optimisation de la surface vendable et l'efficacité des plans grâce à des statistiques détaillées..

#### Tarification

Non disponible

Site officiel : [www.laiout.co](http://www.laiout.co)

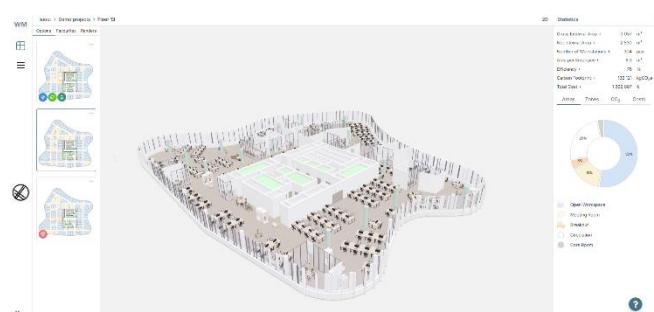


Figure 36 interface laiout

Source : <https://www.laiout.co/blog-posts/looking-back-a-year-of-success-and-growth>

**Finch 3D**

- Exploration d'un large éventail d'options de conception rapidement grâce à l'IA et à la technologie des graphes.
  - Visualisation instantanée des performances du bâtiment via des graphiques et des données
  - Prévention des erreurs

## Tarification

## Version d'essai gratuite

Plan basique 49 €/mois

**Site officiel :** [www.finch3d.com](http://www.finch3d.com)



**Figure 37** interface finch3a

**Source:** <https://aecmag.com/ai/finch3d-starts-to-sing/>

# ARCHITECHTURES

- Définition des critères de conception et modélisation intuitive de la solution via des interfaces 2D/3D en ligne par l'utilisateur.
  - Développement de conception optimisée par l'IA
  - Génération de la solution BIM et des données du projet.

### Tarification

## Forfait Pro

**Prix :** 3 880 DZD/mois (facturé annuellement à 46 561 DZD/an).

**Essai gratuit : 7 jours.**

**Site officiel :** <https://architectures.com/en>



**Figure 38** interface architecture

**Source :** <https://aec-business.com/develop-new-building-projects-in-minutes-with-architectures/>

## PlanFinder

- Génération des plans d'étage en indiquant simplement les limites extérieures et les pièces souhaitées.
  - Comparaison plusieurs variantes de plans d'étage et explorez les compromis
  - Génération des bibliothèque de plans d'étage personnalisés

### Tarification

Essai gratuit (30 jours)

Mode pro (10 euro par mois)

**Licence éducatif (30 euros par année)**

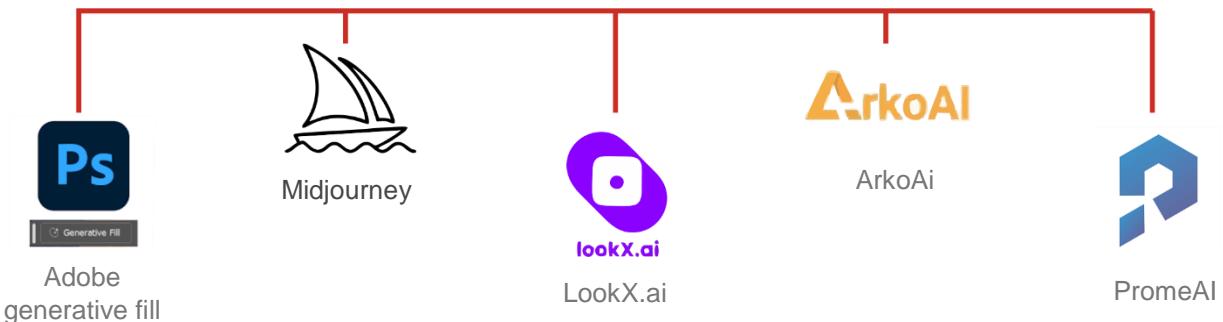
Site officiel : <https://www.planfinder.xyz/>



## **Figure 39 interface planfinder**

Source : <https://www.planfinder.xyz/>

### III.9.2.3 Conception de croquis et rendus architecturaux



#### Adobe générative fill

- Ajout et suppression d'éléments via des invites textuels.
- Fonctionnement basé sur Adobe Firefly, utilisant des images sous licence et du domaine public.
- Interface intuitive intégrée à Photoshop.



Figure 40 interface Photoshop

Source: <https://www.uis.edu/resource/ai/generative-fill-adobe-photoshop>

#### Tarification

Plan Photographie : 23 \$/mois (inclus 250 crédits pour les fonctionnalités génératives).

7 jours gratuits

Site officiel : <https://www.adobe.com/ca/products/photoshop/generative-fill.html>

#### Midjourney

- Génération des visuels détaillés pour des projets de design intérieur ou extérieur.
- Exploration des styles architecturaux variés (moderne, minimaliste, art déco, etc.).
- Création des planches d'ambiance avec des combinaisons de matériaux et de couleurs.

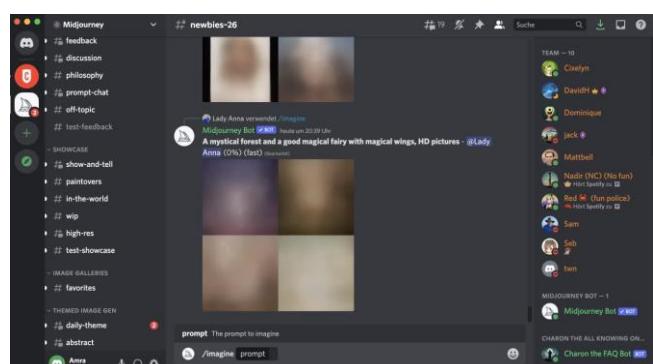


Figure 41 interface midjourney

Source : <https://www.cobeisfresh.com/blog/how-to-midjourney-a-new-way-of-creativity>

#### Tarification

Plan Basic : 10 \$/mois ou 96 \$/an (économies de 2 \$/mois).

Plan Standard : 30 \$/mois ou 288 \$/an (économies de 24 \$/an).

Plan Pro : 60 \$/mois ou 576 \$/an (économies de 48 \$/an).

Site officiel : <https://www.midjourney.com/home>

## LookX ai

- Génération de rendus et modèles 3D à partir de croquis ou de textes.
- Création de vidéos animées pour donner vie aux designs.
- Les utilisateurs peuvent fournir une image de référence pour générer des designs dans un style spécifique.
- Intégration multiplateforme : Plugins disponibles pour SketchUp et Rhino.

### Tarification

À partir de 20 \$/mois. Plan gratuit disponible.

Site officiel : <https://www.lookx.ai/>

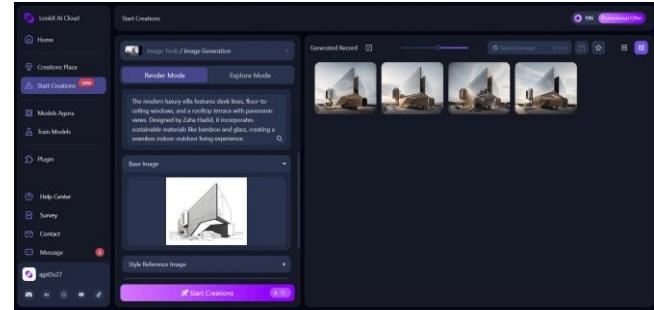


Figure 42 interface lookx ai

Source : <https://www.myarchitectai.com/blog/revit-rendering-software>

## Arko AI

- Production des images haute qualité tout en préservant la géométrie 3D et les matériaux.
- Expérimentation avec différents concepts de design en modifiant la géométrie des modèles 3D grâce à l'IA.

### Tarification

Plan Basique 25 euro/ mois

Plan Avancé 39 euro/mois

Site officiel : <https://arko.ai/>

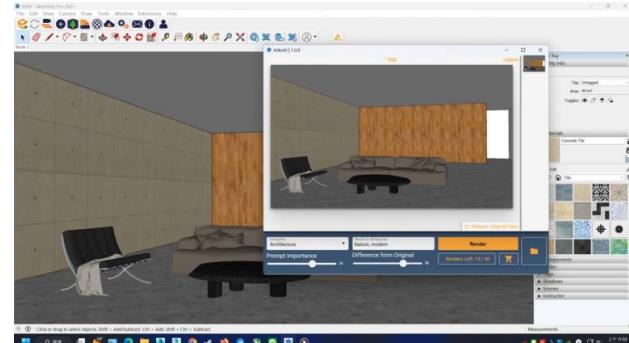


Figure 43 interface arko

Source : <https://download.archsupply.com/get/download-arkoai/>

## PromeAI

- Transformation de dessins manuscrits en visualisations photoréalistes ou stylisées
- Transformation des photos en dessins au trait ou esquisses.
- Choix de styles tels que réaliste, cinématographique, commercial, etc.

### Tarification

Version d'essai gratuite

Plan basique 16 \$/mois

Plan standard 29 \$/mois

Site officiel : <https://www.promeai.pro/>

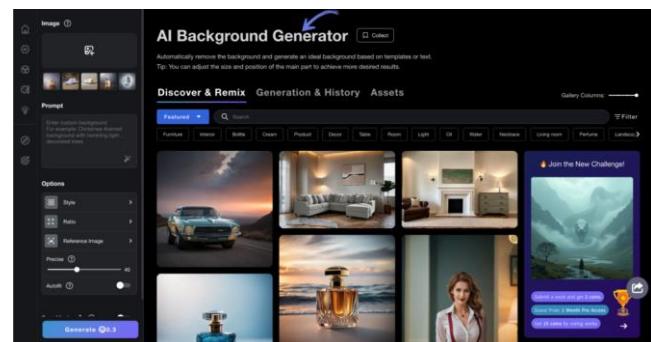
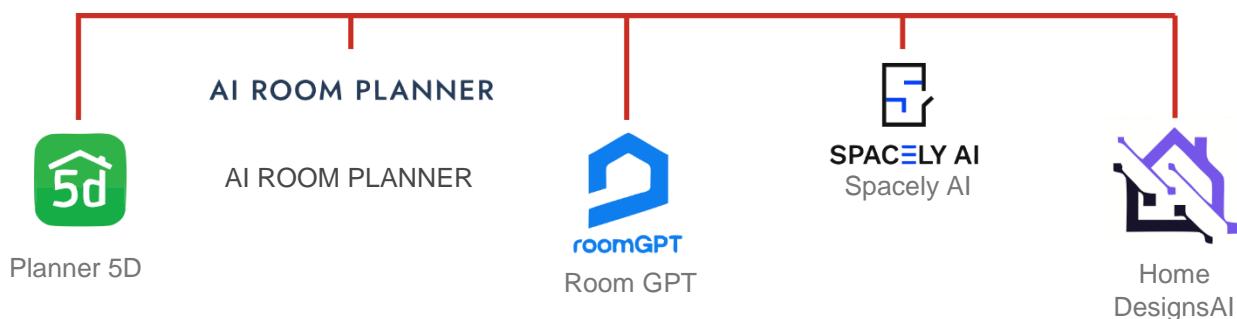


Figure 44 interface promeai

Source : <https://www.fahimai.com/promeai>

### III.9.2.4 Architecture intérieur



#### Planner 5D

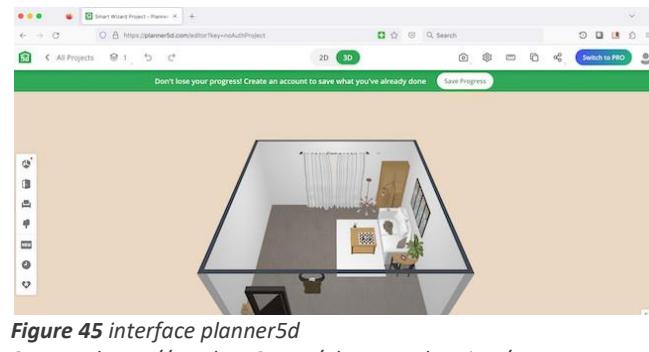
- Création des plans d'étages personnalisé en quelques clics
- Visualisation du projet en 3d réaliste
- Création des ambiances personnalisées en un clic et visualisation des espaces avant même de commencer les travaux.

#### Tarification

Version essai gratuit

Version professionnel 33 euro/mois

**Site officiel :** <https://planner5d.com/fr/pricing>



*Figure 45 interface planner5d*

*Source :* <https://machow2.com/planner-5d-review/>

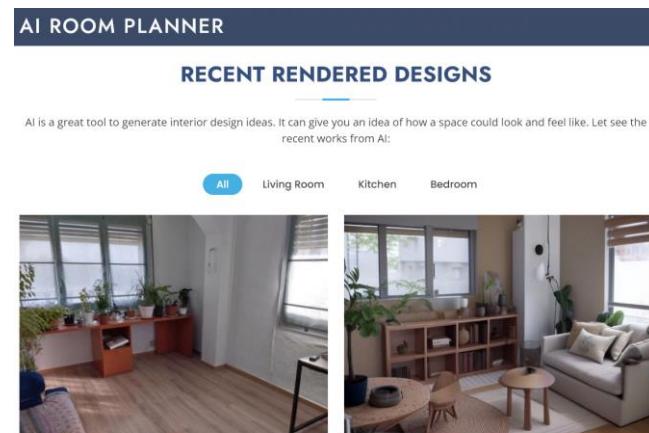
#### AI ROOM PLANNER

Création instantanée de centaines de concepts d'agencement intérieur adaptés à tous les styles décoratifs

#### Tarification

gratuit

**Site officiel :** <https://airoomplanner.com/>



*Figure 46 interface airoomplanner*

*Source :* <https://easywithai.com/ai-architecture-tools/ai-room-planner/>

## RoomGPT

- Génération de thèmes pour les pièces
- Visualisation de la décoration
- Planification des rénovations

### Tarification

Forfait basic : gratuit

Forfait pro : \$10/mois ou \$100/an

### Site

officiel : [https://www.roomgpt.io/?utm\\_source=www.yeschat.ai](https://www.roomgpt.io/?utm_source=www.yeschat.ai)

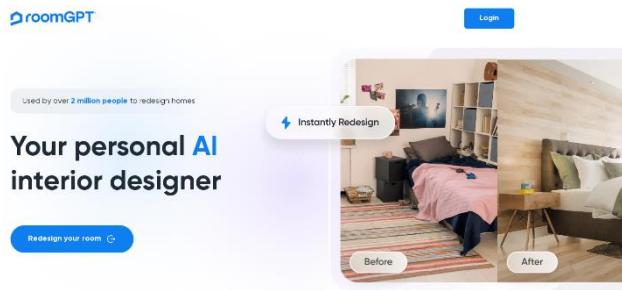


Figure 47 interface roomgpt

Source : <https://www.yeschat.ai/fr/t/roomgpt>

## Spacely AI

- Génération des rendus de perspective photoréalistes époustouflants à partir de des modèles 3D en quelques minutes
- Conception personnalisée à grande échelle

### Tarification

Basique (gratuit) 3 jetons

Payez au fur et à mesure 40 dollars / 80 jetons

Mensuel 40 dollars/ mois

Site officiel : <https://www.spacely.ai/pricing>

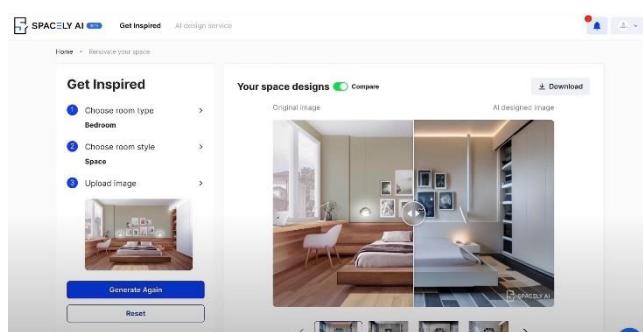


Figure 48 interface spacely ai

Source: [www.reddit.com](https://www.reddit.com)

## Home designs AI

- Outil de suggestion automatisée proposant des designs personnalisés à partir de photos téléchargées, avec variété de styles.
- Identification des mobiliers et objets visuels avec génération de liens d'achat pour reconstitution.

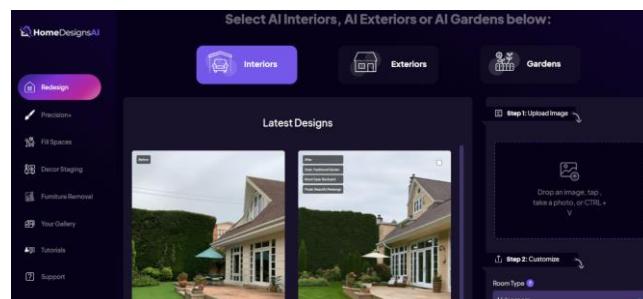


Figure 49 interface homedesigns

Source: <https://homedesigns.ai/go/tech-meets-nature-ais-emerging-influence-in-garden-designs/>

### Tarification

Individuel 27 \$ /mois

Pro mensuel 29 \$/mois

Pro annuel 197 \$ /année

Site officiel : <https://homedesigns.ai/>

### III.9.2.5 Modélisation 3D



#### Luma AI

- création des modèles 3D photoréalistes à partir de descriptions textuelles Meublez et décorez avec plus de 8 000 objets
- Personnalisation des modèles via ajustement des couleurs et textures

#### Tarification

Gratuit : 30 générations par mois, usage non commercial,

9,99 \$/mois : 70 générations par mois, usage non commercial

**Site officiel :** <https://dream-machine.lumalabs.ai/>

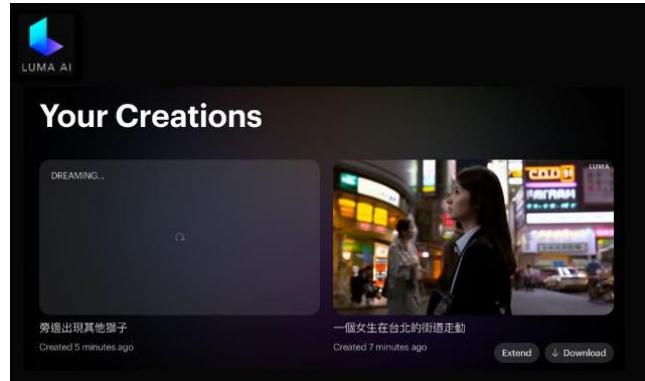


Figure 50 interface luma ai

Source : <https://www.genape.ai/blogs/luma-ai/>

#### Splain AI

- Génération automatisée de modèles 3D depuis des inputs textuels ou visuels.

Génération de rendus photoréalistes pour une visualisation immersive des projets architecturaux

#### Tarification

Gratuit. 0\$/mois. Commencez gratuitement.

Démarreur. 12 \$/mois facturés annuellement ou 15 \$ facturés mensuellement.

**Site officiel :** <https://spline.design/download>

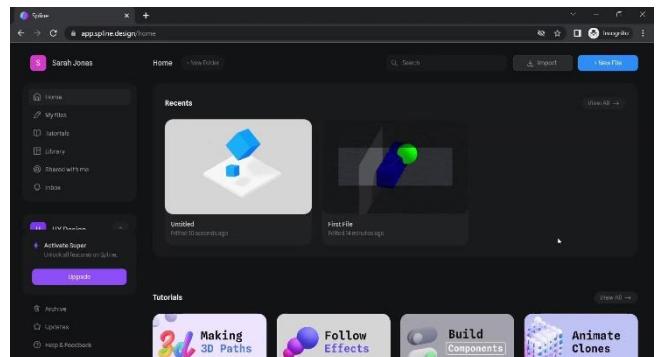


Figure 51 interface spline ai

Source : <https://pageflows.com/pricing/>

## Sloyd AI

- Génération rapide de modèles 3D à partir de prompts textuels.
- Personnalisation aisée des éléments (tailles, matières, couleurs) grâce à une interface claire
- Solution combinant dépliage UV automatique et paramétrage LOD en sortie directe.



Figure 52 interface sloyd ai  
Source : <https://aforeveryone.org/sloyd-ai>

### Tarification

Forfait basic : gratuit

Forfait pro : 15 \$ /mois, par utilisateur Facturé mensuellement

Site officiel : <https://www.sloyd.ai/>

## Meshy AI

- Génération rapide de modèles 3D à partir de descriptions textuelles.
- Conversion d'images en modèles 3D réalistes.
- Application de textures réalistes basées sur des descriptions textuelles.
- Possibilité de créer des animations 3D.



Figure 53 interface meshy ai  
Source : <https://parametric-architecture.com/how-does-the-emergence-of-ai-influence-game-design/>

### Tarification

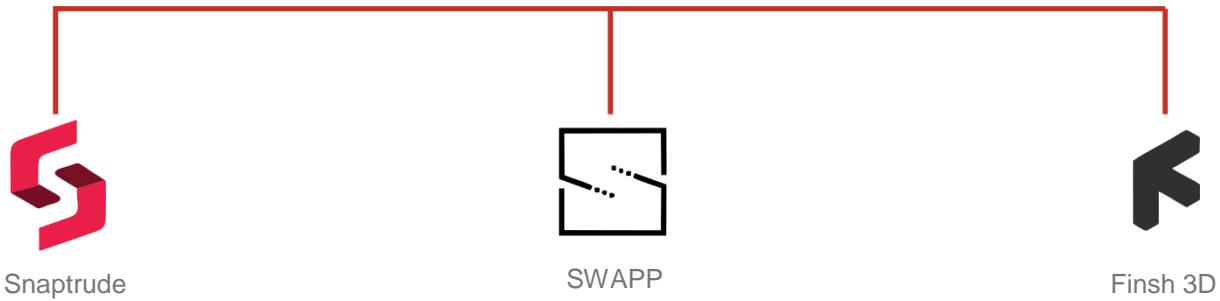
Gratuit 100 crédits par mois

Pro 19 € / mois 1000 crédits

Max 57 €/ mois 4000 crédits

Site officiel : <https://www.meshy.ai/fr/?noRedirect=true>

### III.9.26 Dessin d'exécution



#### Snaptrude

- Collaboration multi-utilisateurs en temps réel sur un même projet
- Modification facile des éléments de conception.
- Génération de coûts précis basée sur la conception.
- Intégration avec des logiciels de modélisation des informations de construction.

#### Tarification

Gratuit : 3 projets

499,00 \$/ année : projets illimité

**Site officiel :** <https://www.snaptrude.com/>



Figure 54 interface snaptrude

Source : <https://www.aecplus.tech/tools/snaptrude>

#### SWAPP

- Réduction du temps passé sur la documentation jusqu'à 50%.
- Maintient des standards élevés grâce à des règles personnalisées basées sur les habitudes de conception de l'utilisateur.
- Intègre bien avec des logiciels comme Revit pour générer des modèles complets

#### Tarification

Gratuit : Non mentionnée précisée. Des démonstrations peuvent être demandées.

Payant : Tarifs non spécifiés sur le site officiel.

**Site officiel :** <https://swapp.ai/>

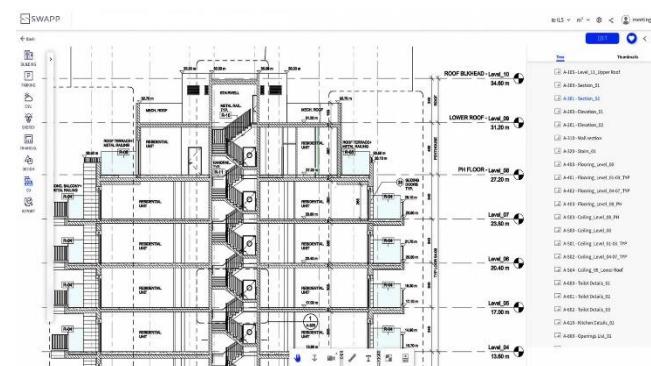


Figure 55 interface swapp

Source : <https://aecmag.com/ai/swapp-the-algorithmic-assistant/>

### III.9.2.7 Immobilier



#### Kurby

- Optimisation de la recherche immobilière via un filtrage intelligent des propriétés selon les critères utilisateur.
- L'outil fournit des informations détaillées sur les propriétés, y compris les données des propriétaires, ce qui est essentiel pour une évaluation complète.

#### Tarification

Gratuit : 5 infos/ jours

10 \$/ mois : informations illimités

**Site officiel :** <https://kurby.ai/>

The screenshot shows the Kurby AI platform's user interface. At the top, there's a navigation bar with links for About, Pricing, Why Kurby, Blog, Contact, and Login / Register. Below the navigation is a main heading "Unlock The Power of Real Estate Intelligence". A search bar is present with placeholder text "Search property, city, or state worldwide". Below the search bar, there's a section titled "Happy Investors using Kurby" featuring a grid of user icons. The main content area displays a map and some data tables. At the bottom, there are several performance metrics: Worldwide Location Insights (150+), Worldwide Nearby Places (100+), Millions of properties (85+), Millions of sales transactions (600k+), and Millions of properties under management (600k+).

**Figure 56** interface kurby

**Source :** <https://www.lacreme.ai/post/les-6-meilleures-ia-pour-immobilier>

#### Parafin ai

- Capacité Crédit de budgets de développement et de modèles d'investissement intégrés.
- Permet aux promoteurs de prendre des décisions basées sur des données pour optimiser la conception et l'investissement.

#### Tarification

500 \$/mois

**Site officiel :** <https://parafin.ai/>

The screenshot shows the Parafin AI platform's user interface. It features a dashboard for a project in Panama City Beach, Florida. The dashboard includes sections for "Financial Overview", "Budget", "Properties", and "Investment". On the left, there's a sidebar with "3D Rendered Options" and "Budget". The main area displays financial data such as "Total Budget" (\$122,000,000), "Building Program" details (Area, %, Availability), and "Development Budget" (Land, Infrastructure, Soft Costs, Hard Costs, Contingency/Margins). To the right, there's a large 3D rendering of a modern building complex with a parking lot and surrounding infrastructure. At the bottom, there's a "Hire a Developer" contact form.

**Figure 57** interface parafin

**Source :** <https://parafin.ai/>

## Jurny

- Génération d'une expérience client optimisée via l'application mobile, permettant un contrôle personnalisé du séjour pour un confort accru.
- Gestion automatisée des avis clients via l'IA Nia de Jurny : analyse intelligente, réponse ciblée, amélioration de la satisfaction client et optimisation de l'e-réputation

### Tarification

Forfait basic : gratuit

Forfait pro : 99 \$ /mois

Site officiel : <https://www.jurny.com/>

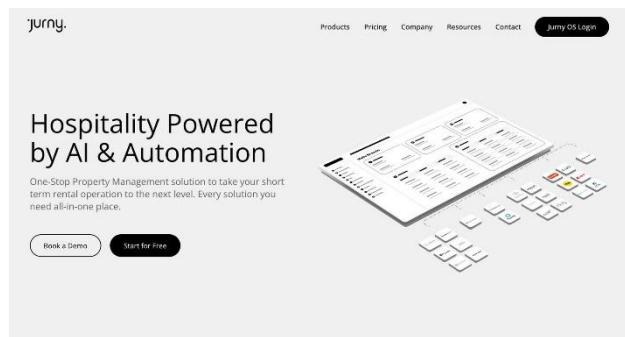


Figure 58 interface jurny

Source : <https://www.lacreme.ai/post/les-6-meilleures-ia-pour-limmobilier>

## Likely AI

- Actualisation en temps réel des données de contact assurant une base optimale (Likely.AI)
- Anticipation précise des futurs vendeurs par l'outil, offrant un avantage stratégique décisif dans le marché immobilier.
- Une veille permanente des interactions client permet l'obtention de données stratégiques, favorisant des interventions précises et opportunes pour optimiser le chiffre d'affaires.

### Tarification

Essai Gratuit pour les nouveaux utilisateurs

Site officiel : [https://likely.ai/?utm\\_source=creati.ai](https://likely.ai/?utm_source=creati.ai)



Figure 59 interface likely ai

Source : <https://www.lacreme.ai/post/les-6-meilleures-ia-pour-limmobilier>

## III.10 IA au service de l'architecture bio climatique et durable

### III.10.1 Définition de l'architecture bio climatique

L'architecture bioclimatique est une approche de conception des bâtiments qui utilise intelligemment les conditions naturelles du site (climat, soleil, vent, végétation) pour améliorer le confort des occupants et réduire la consommation d'énergie.

Selon **Alain Liébard** et **André de Herde**, « La conception architecturale bioclimatique s'inscrit dans la problématique contemporaine liée à l'aménagement harmonieux du territoire et à la préservation du milieu naturel. Cette démarche, partie prenante du développement durable, optimise le confort des habitants, réduit les risques pour leur santé et minimise l'impact du bâti sur l'environnement. (Liébard & de Herde, 2005)

### III.10.2 Aperçue historique

L'architecture bioclimatique existe depuis l'antiquité, les maisons anciennes s'adaptaien déjà au climat en utilisant des techniques comme les murs épais en terre et pierre pour rester frais ou les ouvertures orientées vers le soleil. Au XXe siècle, après le choc pétrolier, cette approche a été modernisée avec des techniques comme l'isolation renforcée et les panneaux solaires. Aujourd'hui, elle combine savoir-faire traditionnel et innovations écologiques pour créer des bâtiments confortables et économies en énergie. (Liébard & de Herde, 2005)



Figure 60 L'architecture traditionnelle et bio climatique au Mali

Source : [/www.urbanisme-francophonie.org/carte-postale/larchitecture-traditionnelle-au-mali](https://www.urbanisme-francophonie.org/carte-postale/larchitecture-traditionnelle-au-mali)

### III.10.3 Principes architecture bioclimatique

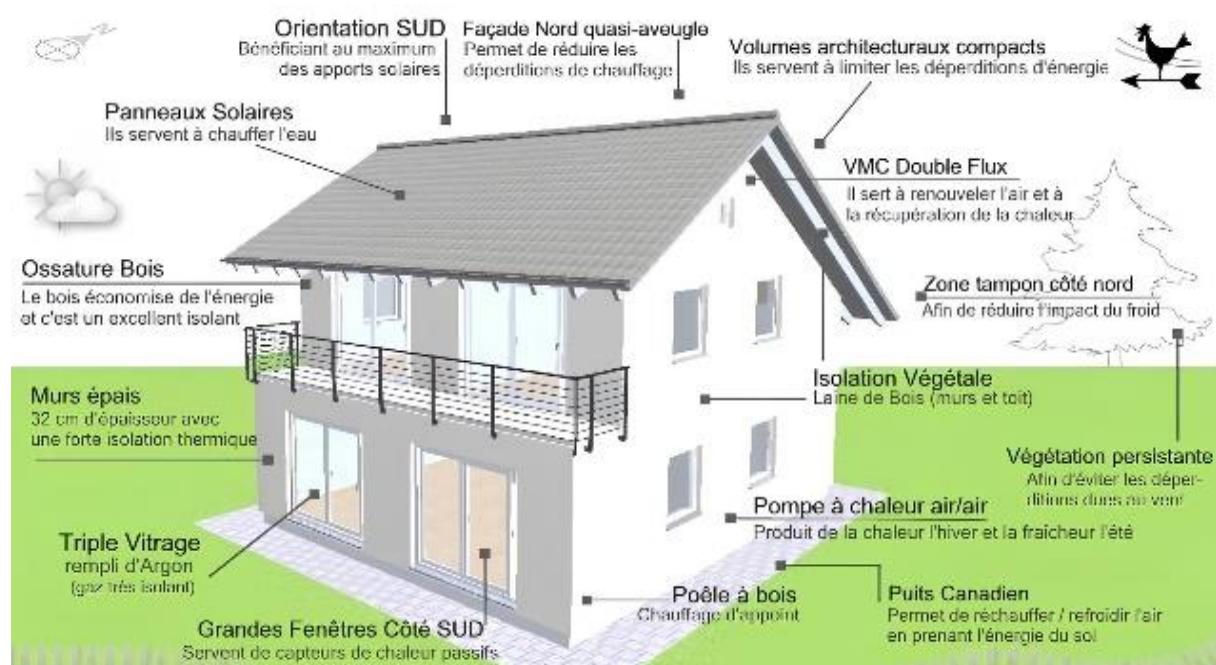


Figure 61 exemple de maison bioclimatique

Source : <https://neogarden-mursvegetaux.com/maison-bioclimatique/>

Dans le livre « Concevoir des bâtiments bioclimatiques » du Pierre Lavigne, Pierre Fernandez ouvrage explique comment améliorer le confort thermique naturel d'un bâtiment tout en particulier l'usage des énergies non renouvelables et les coûts associés (Pierre & Pierre, 2019)

### Une bonne orientation

Concernant une résidence, les pièces utilisées constamment sont positionnées plus ou moins vers le sud. Les chambres sont orientées vers le sud-est pour profiter du rayonnement solaire matinal et maintenir leur fraîcheur en fin de journée. La cuisine, quant à elle, devrait être placée plutôt au sud-ouest, voire même au nord, afin d'éviter des surchauffes pendant la cuisson des aliments.

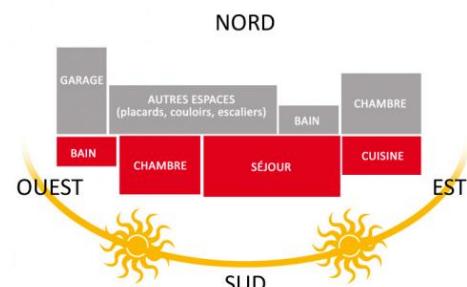


Figure 62 schéma d'orientation recommandé des espaces Source: [www.maisonspartout.fr](http://www.maisonspartout.fr)

### Une forte inertie thermique

L'inertie thermique (ou la masse thermique) correspond à la capacité de stockage thermique d'un habitat : capacité à emmagasiner de la chaleur en hiver ou de la fraîcheur en été, les constructions à forte inertie permettent à l'habitat de se réchauffer ou se refroidir très lentement.

### L'isolation

L'isolation thermique est un complément primordial au bon fonctionnement d'un habitat. Le principe de l'isolation est de poser, avec des matériaux ayant un pouvoir conducteur le plus faible possible, une barrière entre l'extérieur et l'intérieur entre le chaud et le froid

### Des matériaux adéquats

Les matériaux utilisés sont respirant (non étanche). Ils assurent la régulation de l'humidité, contribuent au confort en empêchant les problèmes liés à celle-ci (condensation, moisissure, Concentration de polluants qui peuvent occasionner rhume à répétition, asthme, allergies...) Tout en assurant une meilleure régulation thermique.

### Capter la chaleur :

#### - Stratégie d'hiver

Durant la saison fraîche ; la maison bioclimatique capte la chaleur solaire. En hiver, sous nos latitudes, le soleil se lève au sud-est et se couche au sudouest. Il reste bas sur l'horizon, tout au long de la journée. Pour capter un maximum son rayonnement, les vitrages doivent être orienté au sud. Le verre laisse passer la lumière solaire et il absorbe la chaleur solaire sous forme d'infrarouge. Ainsi, il piège la chaleur solaire à l'intérieur de la maison, c'est ce que l'on appelle l'effet de serre.

#### - Stratégie d'été

Durant la saison chaude, la maison doit se protéger des surchauffes. Sous nos latitudes, en été le soleil se lève au nord-est et se couche au nord-ouest. Il est haut dans le ciel à midi. Pour éviter que le rayonnement solaire pénètre dans la maison, il va falloir camoufler les vitrages derrière des volets, des casquettes de toit calculées en conséquence, des pergolas végétales ou encore des brises soleil. Ou la plantation des arbres qui ombrageront la façade sud de la maison en été et laisseront passer les rayons du soleil en hiver.



Figure 63 les principes d'architecture bioclimatique  
 Source : <https://re2020-enligne.fr/comment-consommer-moins-conception-bioclimatique/>

## L'environnement extérieur

La végétation environnant la maison influence judicieusement le confort bioclimatique de l'habitation. Les plantations de haies ou une rangée d'arbre protègent des vents dominant d'hiver mais aussi de l'excès d'ensoleillement l'été. Les arbres à feuilles caduques offrent en été de l'ombrage bienvenu et limitent les vents d'hiver.

### III.10.4 Architecture durable

L'architecture durable est une conception qui réduit les impacts environnementaux en utilisant des matériaux écologiques et une gestion efficace de l'énergie, tout en améliorant le confort et la santé des occupants grâce à des systèmes passifs et une optimisation des ressources, limitant ainsi les déperditions énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre pour des bâtiments plus performants et respectueux de l'environnement.

#### III.10.4.1 Historique

L'architecture durable, d'abord perçue comme un concept obscur ("sustainable architecture") dans les années 1970, est devenue un mouvement mondial porté par des célébrités (Hulot, Al Gore, Arthus-Bertrand) et récupéré par les politiques. D'abord mode intellectuelle, elle s'est transformée en dogme incontournable, générant congrès et concours, tout en étant parfois critiquée pour son aspect commercial ou son conformisme. Ce qui était une idée marginale domine désormais le débat architectural, entre sincère engagement écologique et suivisme opportuniste. (Jacques, 2009)

### **III.10.4.2 Techniques principales de l'architecture durable**

#### **Etudier les conditions environnementales :**

Pour la construction d'une maison durable, il est essentiel de considérer l'environnement dans lequel elle sera implantée via une étude approfondie du territoire, de l'emplacement, des conditions météorologiques locales, de la circulation d'air, des arbres ou structures voisines susceptibles de bloquer la lumière naturelle, etc.

#### **Considérer son orientation :**

Une orientation idéale est l'un des éléments clés pour réduire au minimum la consommation d'énergie. En d'autres termes, pendant la phase de conception, tenir compte de l'orientation par laquelle la lumière et les rayons solaires pénétrant dans les bâtiments vous donnent l'opportunité d'exploiter cette source de chaleur naturelle. De même, une conception qui prend en considération l'orientation solaire vous permet de maximiser la quantité de lumière naturelle reçue pendant la journée.

#### **Modalités d'exploitation et de préservation de l'énergie**

En plus de garantir une isolation optimale, l'utilisation de brise-soleil et de persiennes à lames orientables contribue significativement à l'efficacité énergétique en jouant le rôle de refroidisseurs passifs. Il est aussi essentiel d'envisager l'exploitation d'énergies renouvelables comme les panneaux solaires et photovoltaïques, les turbines éoliennes, le biogaz, le bois de chauffage, entre autres. On trouve actuellement diverses alternatives écologiques.

#### **L'utilisation des matériaux naturels, recyclés ou recyclables :**

Il est essentiel d'utiliser des matériaux durables pour réduire l'impact écologique des constructions, par exemple en optant pour des matériaux naturels comme les revêtements de sol, les habillages de façade et les tuiles. L'emploi de matières recyclées dans la production de nos systèmes de protection solaire et volets nous aide à minimiser les coûts, à conserver les ressources et à diminuer notre impact environnemental en particulier les émissions de CO<sub>2</sub>.

#### **Diminuer, réutiliser et recycler les déchets :**

En lien étroit avec le point précédent, la minimisation ou l'élimination des déchets environnementaux est un aspect crucial de l'architecture durable. Celle-ci a commencé à intégrer le carton et le métal comme des composants recyclables et réutilisables grâce aux procédés de fabrication. Ainsi, ces matériaux peuvent être réinsérés dans le cycle de production, contribuant à réduire leur empreinte écologique. Il est également crucial de prévenir toute contamination des matériaux

## III.11 Démarche HQE

### III.11.1 Introduction à la démarche HQE

Avec le réchauffement climatique, on prend de plus en plus conscience de l'impact de l'homme sur l'environnement et des limites des ressources naturelles. Le secteur de la construction consomme énormément d'énergie. Pour construire des bâtiments en réduisant leur impact sur l'environnement, des certifications "vertes" ont été mises en place.

Aujourd'hui, il existe beaucoup de certifications différentes, mais elles ne sont pas toutes reconnues dans chaque pays.

La certification HQE (Haute Qualité Environnementale). Son objectif est d'être claire et accessible, pour encourager les professionnels du bâtiment à l'utiliser comme un outil pour améliorer la qualité des constructions. Même si elle est conçue pour la France, elle peut aussi être adaptée à d'autres pays.

### III.11.2 Historique de la démarche HQE

La démarche HQE (Haute Qualité Environnementale) a été créée en 1996. Elle encourage la conception écologique des bâtiments et des produits, en tenant compte de tout leur cycle de vie : fabrication, construction, utilisation, entretien, rénovation et fin de vie.

Dans les années 1990, la prise de conscience des problèmes environnementaux a grandi. Le gouvernement a alors voulu montrer l'importance de protéger notre patrimoine naturel. Par exemple, la loi "**Grenelle de l'Environnement**" cherche à changer les habitudes en fixant de nouveaux objectifs pour les transports, le bâtiment, l'agriculture, etc. La loi "**Grenelle 1**" (24 juin 2009) comprend 57 articles qui définissent ces objectifs. (FLAUSSE, 2011) L'un des plus connus est le "**Facteur 4**", qui vise à réduire de 75 % les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Aujourd'hui, les enjeux écologiques sont donc un défi majeur dans le domaine de la construction.

La démarche HQE n'est pas une obligation légale, mais un guide pour construire et rénover de manière plus durable. Cependant, face à la demande du public pour des règles plus strictes, des certifications ont été créées, comme la **marque NF (Norme Française) Démarche HQE**. Nous verrons comment elles garantissent une bonne application du guide. (FLAUSSE, 2011)

### III.11.3 Qui délivre le label HQE ?

Deux organismes certificateurs, **Certivea** et **Cerqual**, sont responsables de la délivrance du label HQE. Ces organismes autonomes ont un rôle crucial dans l'assurance de l'équité et de la crédibilité du label. **Certivea**, qui a acquis le statut d'Entreprise à Mission en 2022, est une filiale du CSTB, le Centre scientifique et technique du bâtiment. Certivea accorde des certifications pour les bâtiments et les infrastructures. La certification Cerqual Qualitel est issue de l'association Qualitel. Elle se focalise sur l'attribution du label HQE habitat, destiné aux immeubles d'habitation.



Figure 64 la certification HQE Aménagement  
Source: <https://certivea.fr/certifications/hqe-amenagement-durable/>

### III.11.4 Les trois niveaux du label HQE

Le label HQE propose trois niveaux de certification.

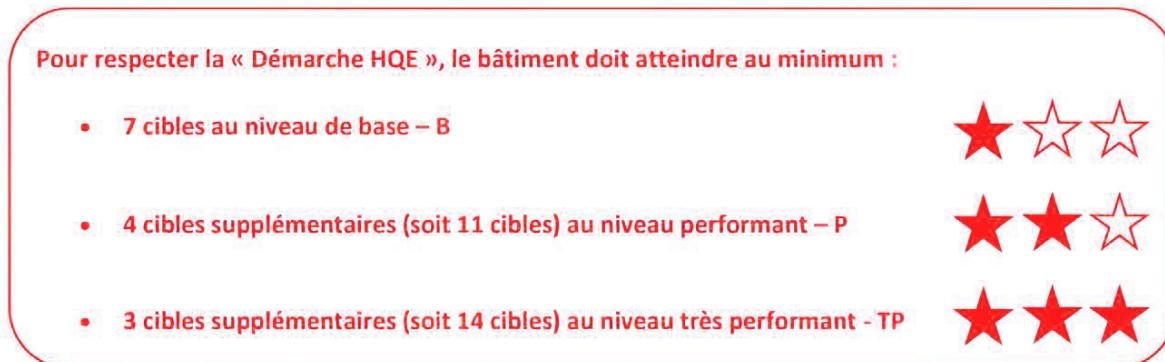


Figure 65 les niveaux de HQE

Source : <https://www.mapes-pdl.fr/wp-content/uploads/2020/02/MARTAA-Les-14-cibles-du-r%C3%A9C3%A9rentiel-HQE.pdf>

### III.11.5 Le coût du label HQE

Le coût de la certification HQE dépend de la taille et de la complexité du projet. Toutefois, il peut être chiffrer entre 15 000 € et 20 000 € pour une surface de 10 000 m<sup>2</sup>. C'est un coût proche de celui d'une certification comme BREEAM.

Mais ce coût semble très minime face aux maints avantages qu'il peut apporter.

La commercialisation de tout ou partie d'un immeuble HQE est nettement plus aisée aujourd'hui que celle d'un bâtiment non certifié.

Le label HQE avec ses 14 cibles traite de — presque — tous les aspects environnementaux. En cela il est en avance sur la réglementation. Pas besoin de remise aux normes en catastrophe, les prochaines modifications de réglementation sont déjà prévues.

Enfin, le label HQE valorise l'immeuble : loyers plus élevés, dépense énergétique moindre, sa rentabilité est garantie. (HQE Bâtiment en Exploitation, 2024)

### III.11.6 Méthodologie de la HQE

La démarche HQE repose sur une approche structurée en trois étapes clés (FLAUSSE, 2011) :

- Un système de gestion environnementale (SME) : Le maître d'ouvrage définit des objectifs écologiques précis et organise le travail des différents acteurs (architectes, constructeurs, etc.) pour les atteindre.
- 14 cibles environnementales : Ces critères couvrent tous les aspects du bâtiment (matériaux, énergie, eau, confort, etc.) et servent de guide pour une construction durable.
- Une évaluation par un organisme indépendant (comme CERQUAL ou CERTIVEA) qui vérifie si le bâtiment répond bien aux exigences HQE avant de délivrer la certification.

### III.11.7 Les 14 cibles

Catégories	Groupes cibles de base	Cibles secondaires
Environnement extérieur	Construction écologique	1. Relation harmonieuse du bâtiment avec son environnement
		2. Sélectionnez des matériaux de construction appropriés et des produits locaux
		3. Chantier de construction avec un minimum de perturbations
	Gestion écologique	4. Gestion de l'énergie
		5. Gestion de l'eau
		6. Gestion des déchets des activités
		7. Gestion de l'entretien et de la préservation du bâtiment
Environnement intérieur	Confort	8. Confort en température et en humidité
		9. Confort acoustique
		10. Confort visuel
		11. Sentez le confort
	Santé	12. La qualité sanitaire des espaces
		13. La qualité de l'air
		14. La qualité de l'eau

Tableau 1 Les 14 cibles de la démarche HQE

### III.11.8 Exemples de plateformes IA pour la conception de bâtiments durables HQE :

Des plateformes d'IA telles qu'**Autodesk Forma**, **Cove.tool**, **Sefaira** et **IES VE** offrent à la conception de bâtiments HQE en améliorant l'efficacité énergétique, le choix des matériaux et l'étude environnementale.

Ces dispositifs exploitent des algorithmes conçus pour reproduire les performances thermiques, minimiser l'impact carbone et optimiser le bien-être, tout en se raccordant aux flux de travail BIM (Revit, SketchUp, etc.). Ainsi, ils facilitent l'acquisition de certifications (LEED, BREEAM, HQE) et assistent les architectes dans la prise de décisions éclairées lors de la phase de conception, en adéquation avec les défis de durabilité.



## III.12 Autodesk Forma

Autodesk Forma est une plateforme de planification urbaine et de conception architecturale intégrant des outils d'analyse prédictive et de modélisation 3D cloud. Destinée aux professionnels de l'architecture, de l'urbanisme et de l'immobilier, elle permet de concevoir, simuler et optimiser collaborativement des environnements bâtis grâce à une approche fondée sur les données.



### III.12.1 Fonctionnalités Principales

#### 1. Environnement de Conception Collaborative

- Modélisation 3D intuitive : Créez des maquettes volumétriques rapidement grâce à des outils de conception paramétrique et une bibliothèque d'objets préconfigurés (bâtiments, routes, espaces verts).
- Travail en temps réel : Plusieurs utilisateurs peuvent collaborer simultanément sur un même projet, avec des modifications synchronisées dans le cloud.
- Interopérabilité : Compatible avec Revit, AutoCAD et d'autres logiciels Autodesk, ainsi qu'avec des formats standards comme IFC (BIM).

#### 2. Analyses et Simulations Prédictives

- Microclimat et confort thermique : Évaluez l'impact du vent, de l'ensoleillement et des îlots de chaleur urbains.
- Éclairage naturel : Simulez la pénétration de la lumière dans les bâtiments pour optimiser les conceptions.
- Acoustique : Analysez la propagation du bruit en fonction de la disposition des bâtiments.
- Empreinte carbone : Estimez les émissions CO<sub>2</sub> dès les phases amont pour des projets plus durables.

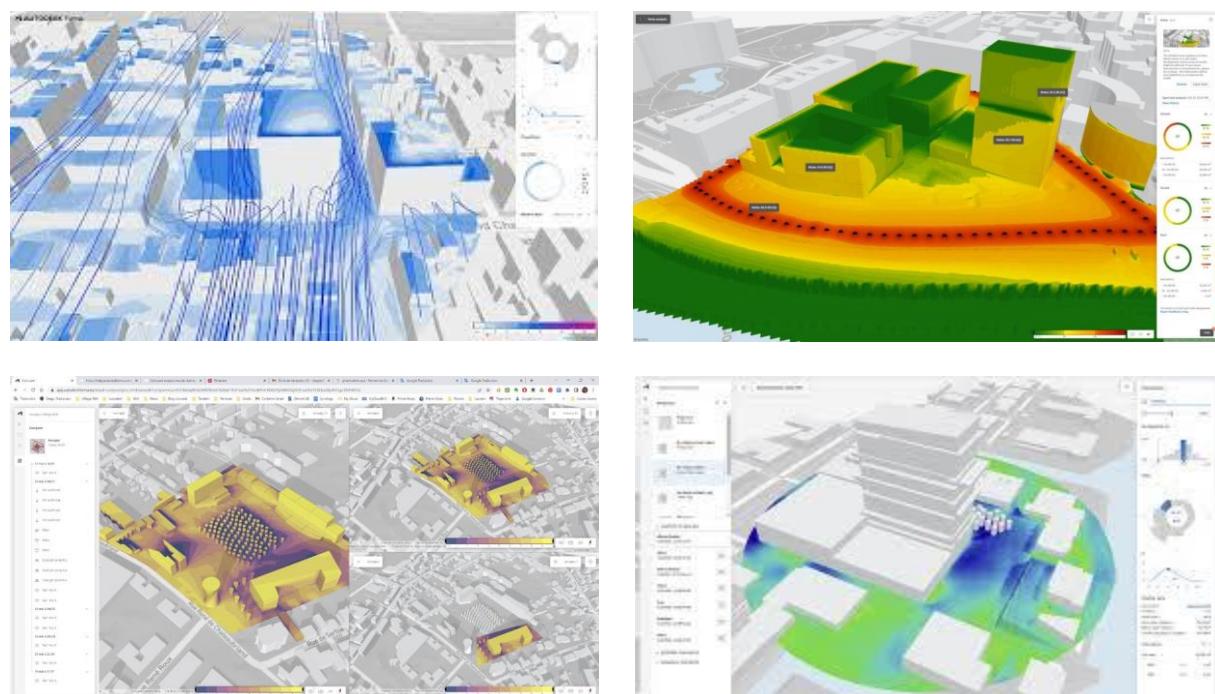


Figure 66 analyse autodesk forma / Source: [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com)

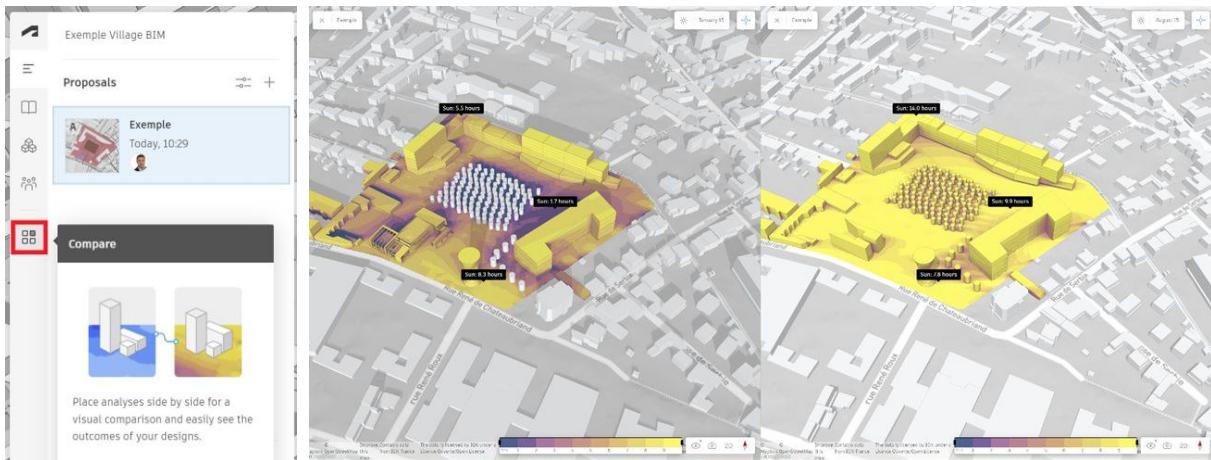


Figure 67 analyse d'ensoleilement forma Source: Autodesk Forma

### 3. Data-Driven Decision Making

- Intégration de données géo spatiales : Importez des cartes GIS (SIG) pour contextualiser les projets (relief, réseaux routiers, zones inondables).
- Indicateurs clés : Visualisez des métriques comme la densité de construction, les surfaces habitables ou les coûts estimés.
- Scénarios comparatifs : Testez différentes options de conception et comparez leurs performances.

#### III.12.2 Cas d'Usage

- **Urbanistes** : Planification de quartiers durables.
- **Promoteurs** : Études de faisabilité et maximisation de la rentabilité.
- **Architectes** : Conception responsive aux contraintes environnementales.
- **Collectivités** : Visualisation de projets pour la concertation publique.

#### III.12.3 Tarification et Disponibilité

##### Abonnement flexible

- Abonnement annuel 1752 euro
- Abonnement mensuel 216 euro

**Essai gratuit** : Une version d'évaluation est proposée sur le site d'Autodesk.

## Conclusion du chapitre

Ce chapitre révèle que l'IA offre des opportunités majeures pour l'architecture, malgré des défis techniques et éthiques. Son application dans des projets bioclimatiques démontre son potentiel pour concilier innovation et durabilité.



## IV. Analyse d'exemples

### Introduction

Ce chapitre compare deux projets réalisés avec des outils IA (Autodesk Forma et Cove.tool). Il détaille leurs méthodologies, leurs résultats et leurs limites, illustrant comment ces technologies optimisent la conception

#### IV.1 Complexe de logements étudiants

##### À Malmi

**Nom du Projet :** Résidence étudiante à Malmi

**Localisation :** Malmi, Helsinki, Finlande

**Type de Projet :** Résidence étudiante / Logement urbain

**Maîtrise d'Ouvrage :** Arco (Architecture & Urban Design)

**Outils Utilisés :** Autodesk Forma (analyse de site, conception data-driven), BIM

**Projet réalisé :** Non (études)



Figure 68 Situation / Source: OpenStreetMap



Figure 70 Plan de masse Source : <https://blogs.autodesk.com/forma>



Figure 69 Résidence étudiante à Malmi  
Source : <https://blogs.autodesk.com/forma>

##### IV.1.1 Description du projet

ARCO Architecture Company, le plus grand cabinet d'architecture de Finlande, conçoit un nouveau complexe de logements étudiants à Malmi, un quartier dynamique d'Helsinki.

Ce bâtiment de huit étages, avec sa forme circulaire, sert de repère à l'entrée de la ville. Bien que bien situé près des transports, le bruit était un défi. Pour y remédier, l'équipe a créé une cour intérieure protégée, où les appartements s'ouvrent pour éviter le bruit extérieur. Deux étages supplémentaires ont été ajoutés pour profiter de la lumière du sud, offrant 20 appartements de plus avec de meilleures vues. Grâce à cette plateforme, l'équipe a vérifié que ces étages ces niveaux ne créaient pas d'ombre pas la cour et a optimisé la répartition des espaces en analysant la lumière naturelle. Forma a aussi aidé à concevoir une cour paysagée bien ensoleillée. L'outil a permis d'importer des modèles 3D, de tester des idées rapidement et d'améliorer les performances globales du bâtiment. (Jeanne, 2023)

## IV.1.2 Stratégies de conception pour un site urbain complexe

- **La forme circulaire comme solution anti-bruit**

Pour protéger les étudiants du bruit des routes et de la gare voisine, ARCO a choisi une forme circulaire pour le bâtiment. Cette conception fermée crée une barrière naturelle contre les nuisances sonores, tout en orientant les appartements vers l'intérieur, où la cour centrale reste calme. Ainsi, les résidents profitent d'un espace de vie tranquille, malgré le site bruyant. Une solution simple mais efficace, alliant architecture et confort.



Figure 71 Plan

Source : <https://blogs.autodesk.com/forma>

- **Création d'une cour intérieure protégée**

Pour protéger les étudiants du bruit extérieur, les architectes ont imaginé une cour au centre du bâtiment. Cette cour, entourée par les logements, agit comme un bouclier contre les nuisances sonores tout en offrant un espace calme et vert. Les appartements s'ouvrent vers cet espace intérieur, respectant les normes acoustiques et créant un environnement plus agréable à vivre. La cour devient



Figure 72 Cour centrale / Source : <https://blogs.autodesk.com/forma>

ainsi un lieu de vie sûr et paisible, malgré le bruit des routes et de la gare à proximité.

- Ajout d'étages supérieurs pour maximiser la lumière et les vues**

Pour offrir plus de logements et améliorer le confort des étudiants, deux étages supplémentaires (7e et 8e) ont été ajoutés. Grâce à leur orientation sud, ces étages bénéficient d'une meilleure lumière naturelle et de vues dégagées sur la ville. L'équipe a utilisé Autodesk Forma pour vérifier que ces nouveaux niveaux n'assombrissaient pas la cour intérieure, tout en créant 20 appartements supplémentaires. Cette solution intelligente a permis d'optimiser l'espace sans sacrifier la qualité de vie des résidents.

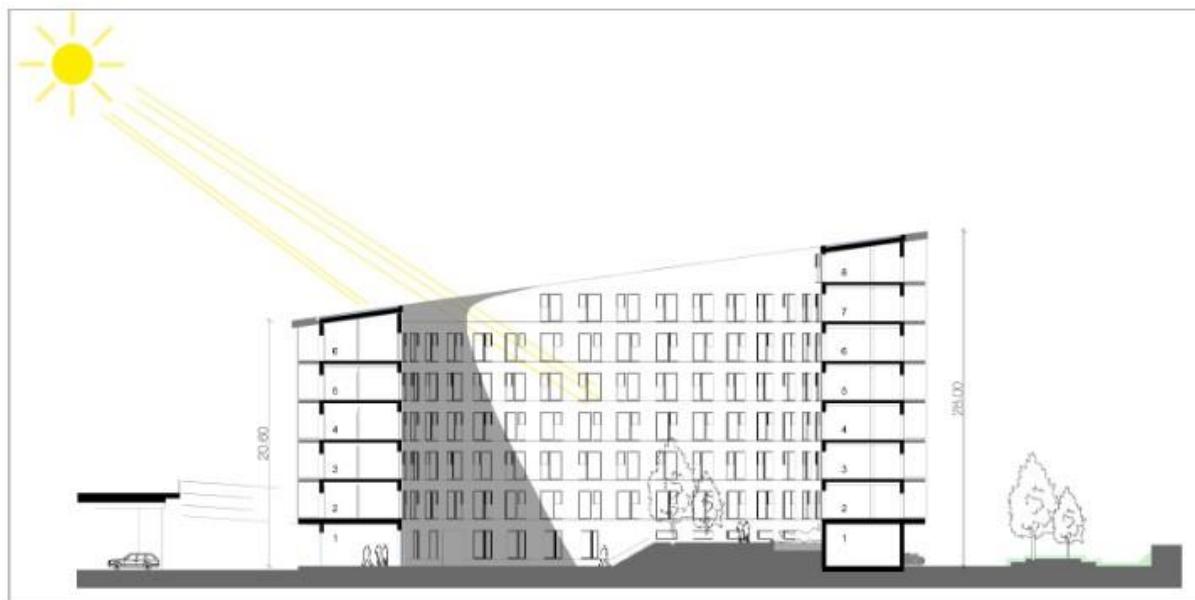


Figure 73 Coupe montrant le volume optimisé du bâtiment et son orientation vers le sud

Source : <https://blogs.autodesk.com/forma>

#### IV.1.3 Synthèse 01 : Simulation des niveaux sonores et optimisation acoustique

Pour lutter contre le bruit lié à la proximité des routes et de la gare, l'équipe a utilisé Autodesk Forma pour analyser et simuler les nuisances sonores. Les résultats ont confirmé que la forme circulaire du bâtiment et la cour intérieure protégée réduisaient efficacement le bruit pour les logements. Cette approche a permis de valider la conception tout en respectant les normes acoustiques, garantissant un environnement calme pour les étudiants.

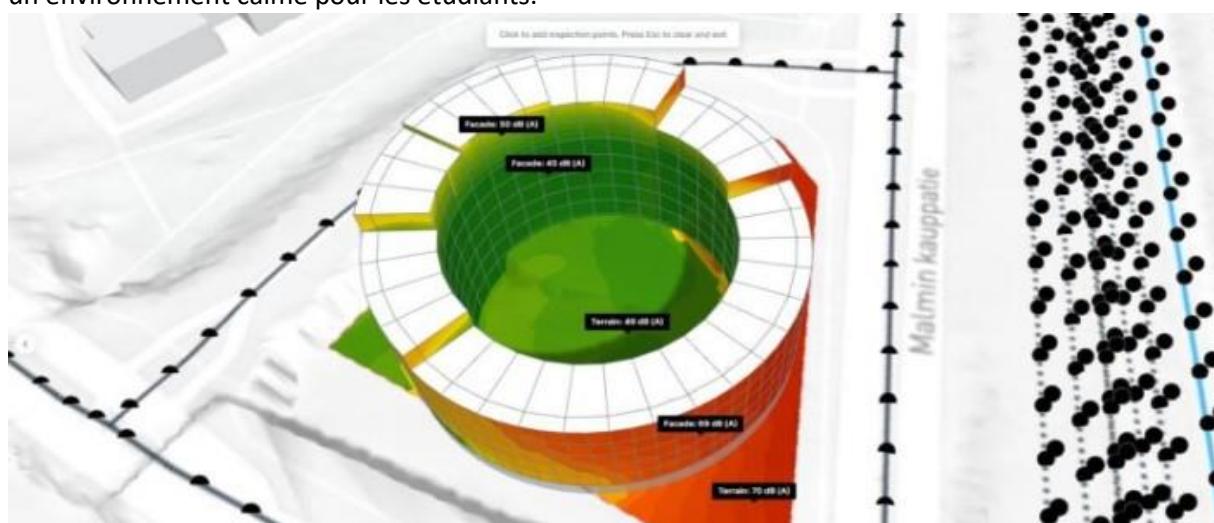


Figure 74 Analyse du bruit de forme montrant comment le volume cylindrique crée un intérieur abrité

Source : <https://blogs.autodesk.com/forma>

#### IV.1.4 Synthèse 02 : analyse d'ensoleillement

L'analyse d'ensoleillement a joué un rôle clé dans l'optimisation du projet, permettant à l'équipe ARCO d'évaluer la distribution de la lumière naturelle dans le bâtiment et la cour intérieure. Grâce à Autodesk Forma, les architectes ont pu vérifier que l'ajout de deux étages supérieurs n'assombrissait pas les logements en dessous, tout en maximisant l'apport lumineux pour les appartements orientés au sud. Les simulations ont également guidé l'aménagement de la cour paysagée, en identifiant les zones les mieux ensoleillées pour en faire un espace agréable. Cette approche data-driven a permis de concilier densité urbaine et qualité de vie, prouvant que des solutions intelligentes peuvent transformer des contraintes en opportunités.

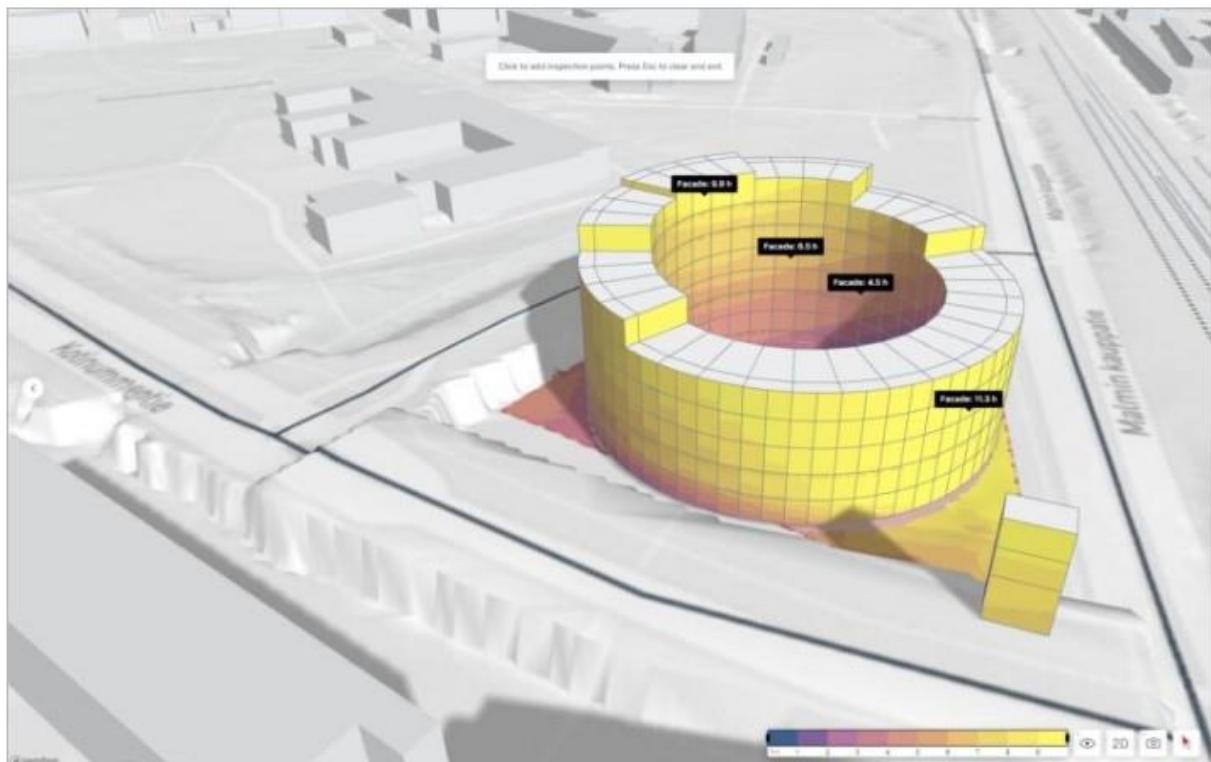
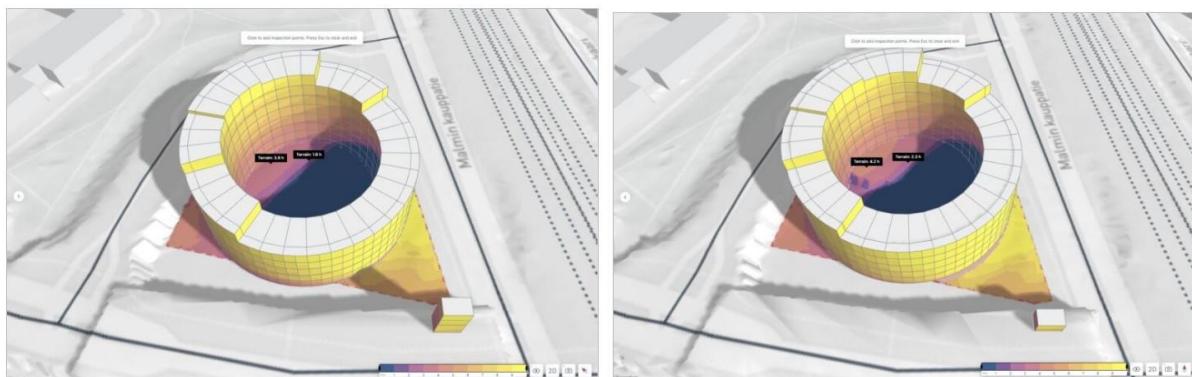


Figure 75 Analyse d'ensoleillement / Source : <https://blogs.autodesk.com/forma>

#### Cour centrale

Pour créer un espace calme et lumineux malgré le site bruyant, les architectes ont imaginé une cour centrale surélevée. Cette solution intelligente permet : 1) de protéger les étudiants du bruit des routes et de la gare grâce à la hauteur, 2) d'offrir un jardin intérieur bien ensoleillé toute l'année, et 3) de garder une bonne lumière dans tous les appartements. Grâce au logiciel Forma, ils ont pu tester et ajuster la hauteur parfaite pour que la cour soit à la fois utile et agréable, tout en respectant les règles de construction.

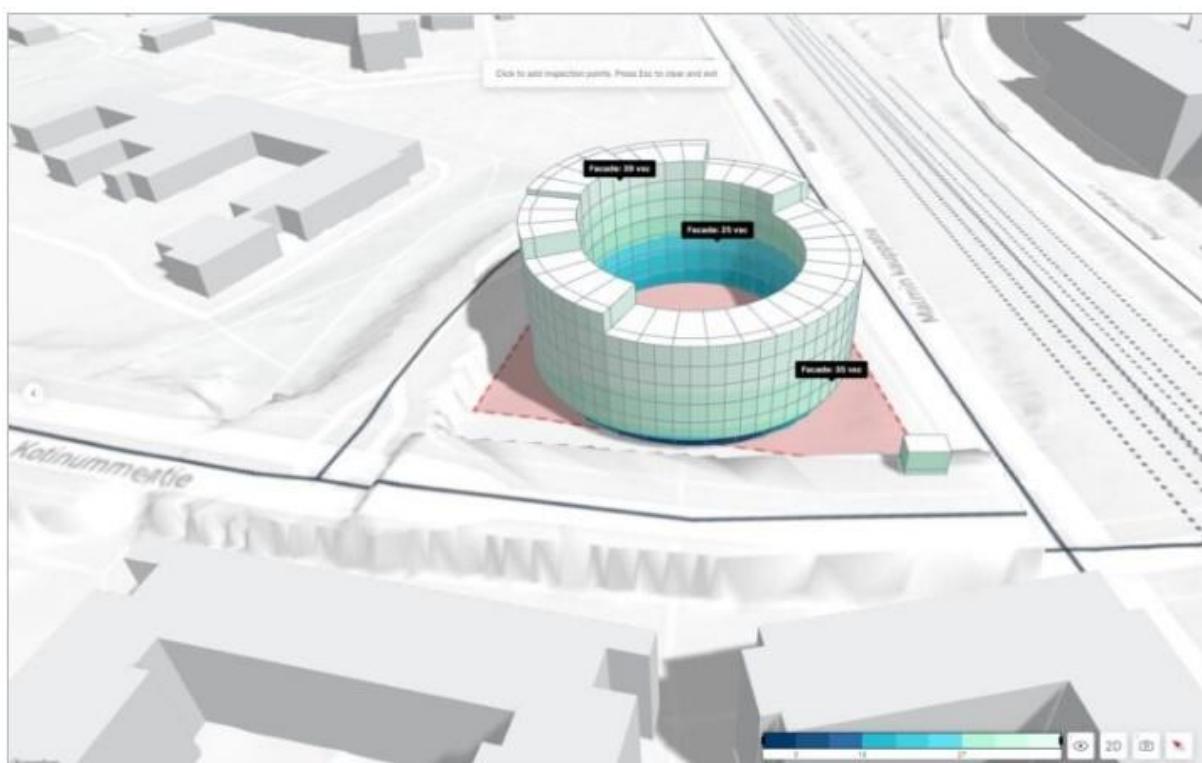


**Figure 76** Comparaison des performances : Cour centrale plate vs surélevée

Source : <https://blogs.autodesk.com/forma>

#### IV.1.5 Synthèse 03 : analyse de lumière naturelle

L'étude de la lumière naturelle a été essentielle pour optimiser la conception du complexe étudiant. Grâce à Autodesk Forma, l'équipe a pu simuler la diffusion lumineuse, confirmant que les appartements inférieurs bénéficiaient d'une luminosité suffisante malgré la hauteur du bâtiment. Les analyses ont également permis d'identifier les espaces moins exposés, affectés aux services plutôt qu'aux logements, et d'adapter la cour intérieure pour un ensoleillement optimal. Ces données ont guidé les choix architecturaux, garantissant confort visuel et efficacité énergétique.



**Figure 77** analyse de lumière naturelle / Source : <https://blogs.autodesk.com/forma>

## IV.1.6 Analyse critique

Autodesk Forma se présente comme un outil rapide et puissant facilitant la conception urbaine et architecturale. Cette plateforme permet une génération rapide de volumes architecturaux et un test efficace de différentes options sans perte de temps. Parmi ses principaux atouts figurent les simulations et analyses en temps réel, offrant une visualisation instantanée de l'impact du vent, de l'ensoleillement ou du bruit sur un projet, ce qui facilite la prise de décision éclairée.

La sélection du site d'intervention est rendue possible, avec la capacité d'importer des données réelles ou de modifier le terrain selon les besoins spécifiques. Plusieurs propositions peuvent être comparées et ajustées simultanément pour identifier la solution optimale. L'importation de projets au format OBJ avec dimensions réelles s'avère particulièrement utile pour l'intégration de modèles 3D provenant d'autres logiciels.

Cependant, certains inconvénients sont à noter :

Au-delà de la période d'essai gratuit de 30 jours, un abonnement mensuel de 260\$ est requis, bien qu'une licence académique soit disponible pour les enseignants et étudiants.

Des ressources matérielles importantes sont nécessaires, notamment un ordinateur performant et une connexion internet stable, les analyses aérodynamiques pouvant nécessiter au moins 30 minutes de calcul.

Des imprécisions dans la topographie du site peuvent survenir, imposant une vérification manuelle des données.

Malgré ces limites, Autodesk Forma demeure un outil précieux pour les étudiants, architectes, enseignants et urbanistes souhaitant optimiser leur temps de travail et adopter une approche plus intelligente de la conception.

## IV.2 Georgia Tech Campus Center

**Nom :** Georgia Tech Campus Center (rénovation/extension)

**Lieu:** Georgia Institute of Technology, Atlanta, États-Unis

**Type de projet :** Rénovation durable / Bâtiment universitaire

**Maîtrise d'ouvrage :** Georgia Tech (institution publique)

**Maîtrise d'œuvre :** Atelier d'architectes, Cooper Carry

**Outils utilisés :** Cove.tool

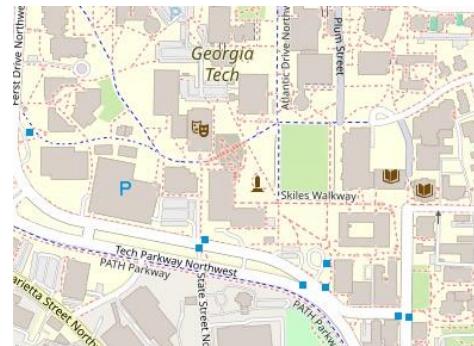


Figure 78 Situation Source : openstreetmap



Figure 79 plan de masse

Source : <https://www.coopercarry.com/projects/georgia-tech-campus-center/>

### IV.2.1 Description du projet

Le Georgia Tech Campus Center est un grand projet de 28 000 m<sup>2</sup> qui va agrandir le campus autour de Tech Green, son espace central. Il modernisera l'ancien Student Center des années 1970, conçu à l'origine pour 7 000 personnes, pour accueillir désormais 23 000 étudiants et 7 000 enseignants. Le projet comprend trois bâtiments :

- La rénovation du Wenn Student Center,
- Un nouveau hall d'exposition
- Un pavillon avec des espaces extérieurs (sentiers et places).

L'objectif est de créer un campus plus durable et performant, en suivant un plan stratégique pour réduire la consommation d'énergie et favoriser la vie étudiante. Ce projet servira de modèle pour les futurs campus.

Pour réussir ce projet ambitieux, l'équipe d'architectes et d'ingénieurs a utilisé des outils numériques avancés (comme cove.tool, BIM 360 et Bluebeam) dès le début. Ces technologies ont permis de simplifier la conception, éviter des modifications coûteuses et optimiser les coûts pendant la construction. Ce projet montre comment l'innovation et le travail d'équipe peuvent créer des campus plus efficaces, durables et adaptés aux besoins de tous. (Georgia Tech Public Safety Facility, s.d.)

## IV.2.2 Objectifs du projet

- **Consolidation et modernisation** : Substituer et regrouper les équipements vétustes en un lieu unique performant.
- **Durabilité et performance énergétique** : Continuer à respecter les critères de construction durable, y compris ASHRAE 189.1, la certification WELL Building et l'évaluation Georgia Peach Green Building.
- **Amélioration du confort et de la santé des résidents** : Mettre en œuvre des approches de conception écologique qui assurent le bien-être des occupants tout en atteignant des standards rigoureux de rendement énergétique.

## IV.2.3 Analyse climatique et stratégies de conception

Il est important de bien comprendre le climat local pour concevoir un bâtiment efficace. En optimisant la forme du bâtiment dès le début, on peut améliorer sa performance énergétique sans augmenter les coûts. Des outils d'analyse climatique aident à choisir la meilleure orientation, forme et quantité de vitres pour équilibrer performance énergétique et budget.

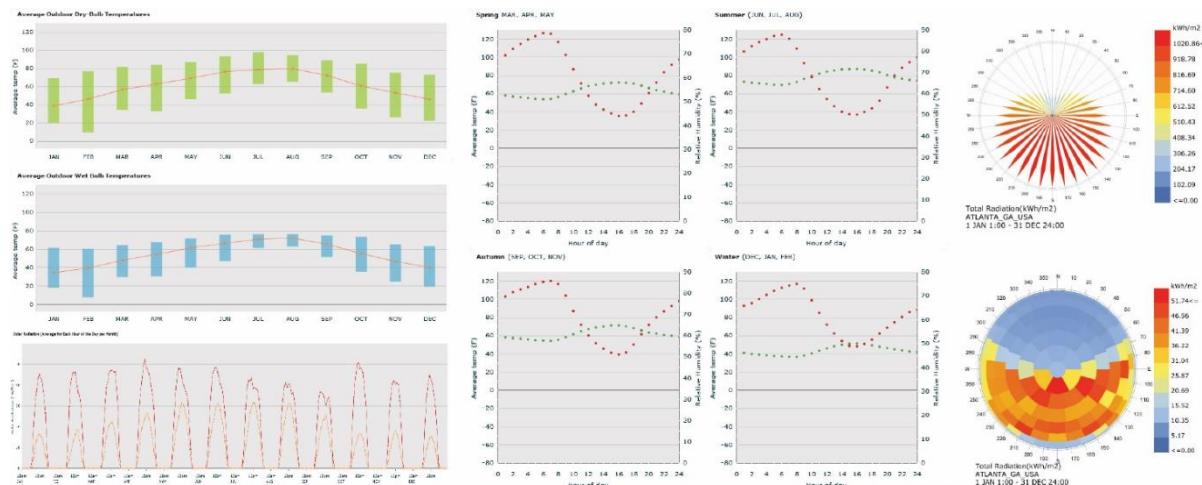


Figure 80 Résultats d'analyse climatique ( température – rayonnement solaire – humidité )  
Source : <https://help.covetool.com/en/articles/2687528-georgia-tech-campus-center>

### Température annuelle

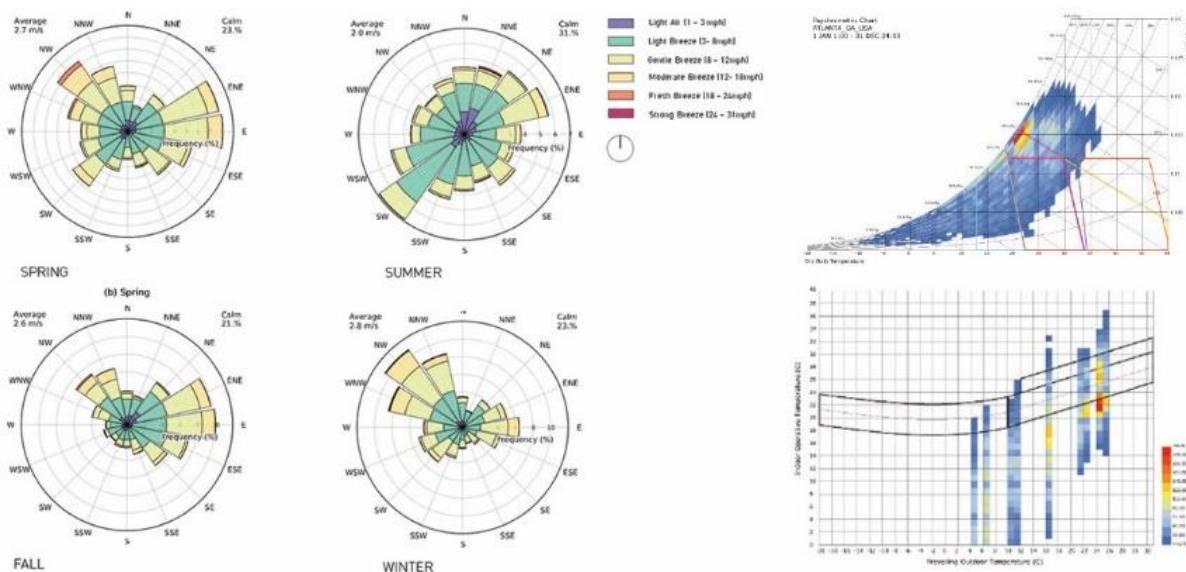
Atlanta a un climat chaud et humide. Les températures varient beaucoup dans l'année, avec plus de jours nécessitant une climatisation que de chauffage, ce qui peut surprendre.

### Rayonnement solaire

En été, la ville reçoit moins de soleil direct (en rouge) et plus de soleil diffus (en jaune) à cause des nuages et des pluies fréquentes.

### Humidité vs température

L'été à Atlanta a de grandes différences d'humidité entre le jour (rouge) et la nuit. Comme l'air reste souvent humide, la ventilation naturelle est rarement efficace.



**Figure 81** Résultats d'analyse climatique (Vents –Graphique psychométrique)  
Source : <https://help.covetool.com/en/articles/2687528-georgia-tech-campus-center>

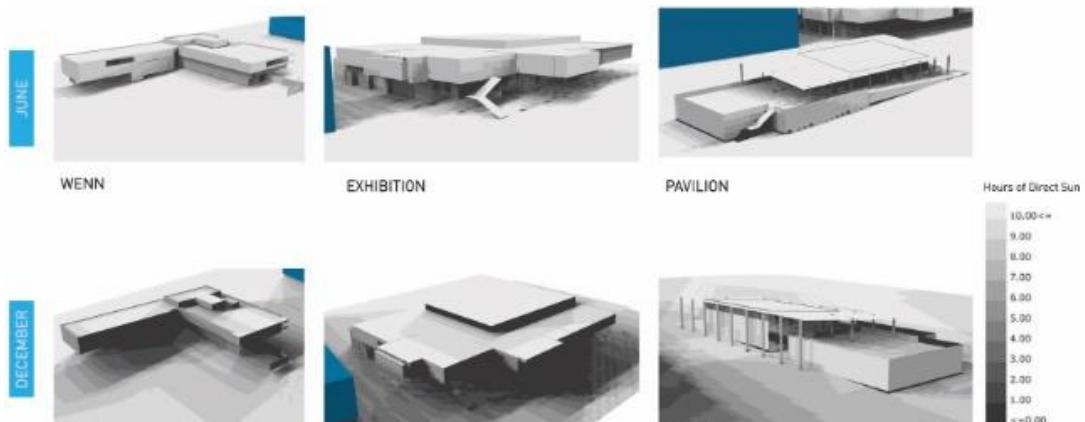
Le diagramme des vents montre que la majeure partie du temps, le vent vient principalement du sud-ouest au printemps, en été et en automne, ce qui peut être bénéfique pour la ventilation. Le diagramme psychrométrique illustre l'impact de la température et de l'humidité sur le confort. À Atlanta, l'optimal pour le confort consiste à recourir à des systèmes de chauffage internes durant l'hiver et à une déshumidification pendant l'été. D'autres techniques telles que la masse thermique, les ventilateurs ou le refroidissement par évaporation ne sont pas efficaces dans ce contexte. Finalement, le diagramme de confort adaptatif indique que, la plupart du temps, les températures (intérieures et extérieures) ne se situent pas dans la zone de confort. Cela confirme que les systèmes mécaniques (climatisation, chauffage) sont essentiels pour assurer un bon niveau de confort.

#### IV.2.4 Optimisation du projet grâce à l'analyse Cove.tool : Synthèse et applications concrètes

##### IV.2.4.1 Carte des ombres

Ce dessin montre comment les ombres se déplacent pendant l'année, créées par les bâtiments présentés ci-dessous et par le nouveau Campus Center. Le projet comprend trois parties :

Le bâtiment étudiant Wenn / Le hall pour les expositions / Le pavillon



**Figure 82** carte des ombres / Source : <https://help.covetool.com/en/articles/2687528-georgia-tech-campus-center>

#### IV.2.4.2 Cartes de rayonnement

Ces graphiques ci-dessous montre la quantité de soleil reçue par chaque bâtiment, ce qui permet de voir quelles façades sont peu ou fortement ensoleillées. Ces informations sont précieuses dès le début du projet pour concevoir des façades adaptées : on peut ainsi déterminer la surface de vitrage idéale et le meilleur emplacement pour les fenêtres en fonction de l'ensoleillement de chaque partie du bâtiment.

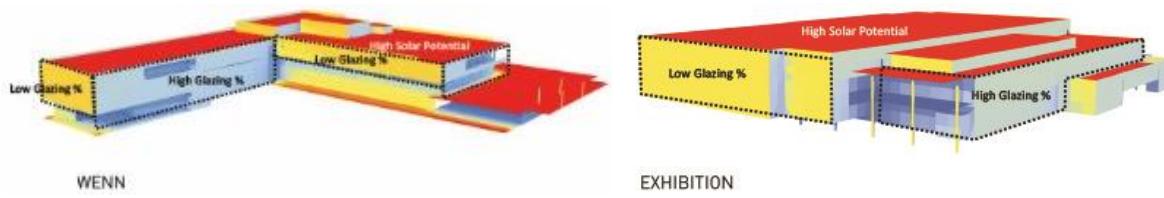


Figure 83 carte de rayonnement / Source : <https://help.covetool.com/en/articles/2687528-georgia-tech-campus-center>

#### IV.2.4.3 Microclimat

Cette carte montre la quantité de soleil (en kWh/m<sup>2</sup>) reçue par le terrain. On voit clairement que la partie est reçoit beaucoup de soleil, tandis que la zone basse, plus ombragée, est parfaite pour créer un espace protégé du soleil. Les graphiques à côté indiquent comment la température varie et comment les bâtiments déjà présents affectent le site. Ces informations nous aident à mieux comprendre le microclimat local et comment l'aménagement peut influencer l'environnement.

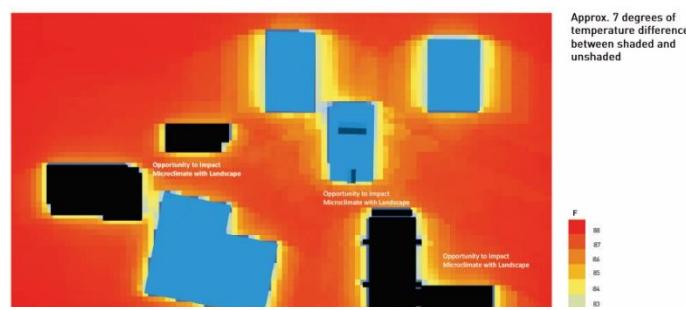


Figure 84 Microclimat / Source : <https://help.covetool.com/en/articles/2687528-georgia-tech-campus-center>

#### IV.2.4.4 Étude de la lumière naturelle et de l'éblouissement

Il démontre l'importance d'une bonne lumière naturelle dans les bâtiments universitaires pour le bien-être des étudiants. Grâce à ce logiciel, il ont pu analyser précisément la répartition de la lumière et d'éviter les problèmes d'éblouissement. Il aide les architectes à positionner intelligemment les fenêtres et à prévoir des protections solaires adaptées. Il aboutit ainsi à des espaces mieux éclairés,

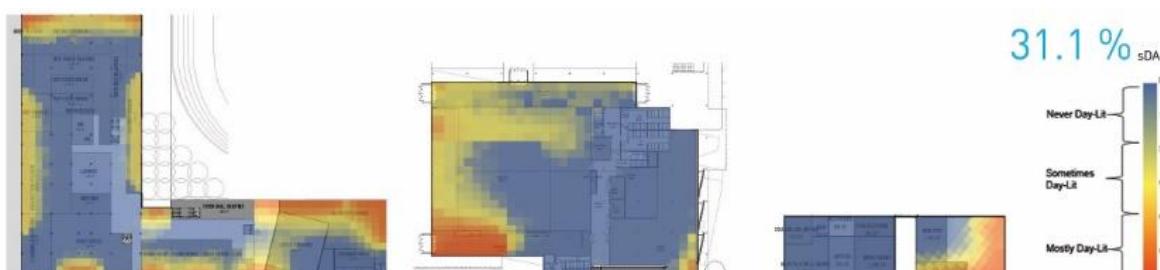


Figure 85 étude de lumière naturelle / Source : <https://help.covetool.com/en/articles/2687528-georgia-tech-campus-center>

plus confortables pour étudier et plus économies en énergie. Enfin, il montre comment adapter ces solutions aux différentes saisons pour un résultat optimal toute l'année

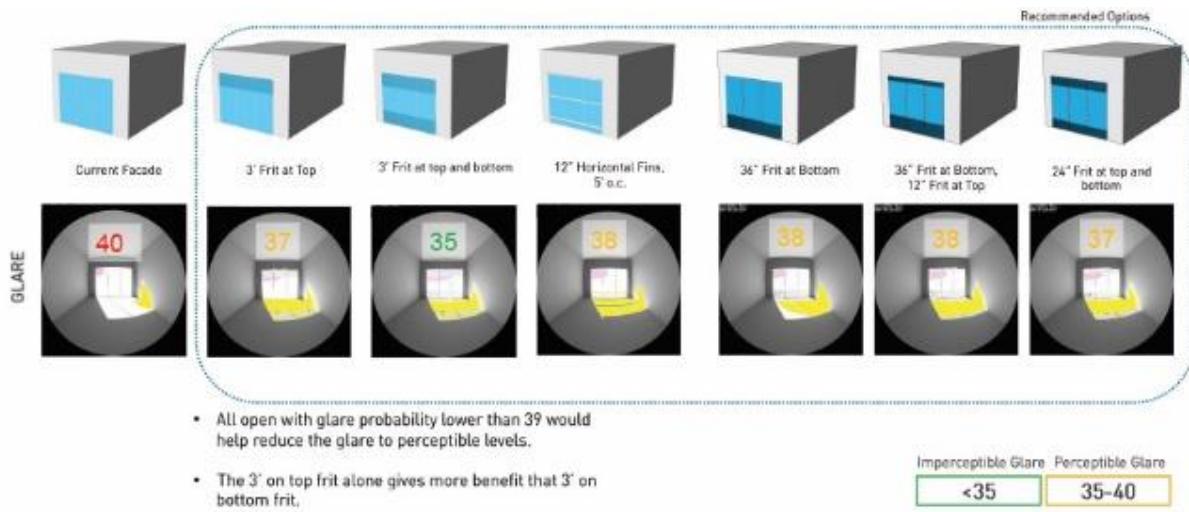
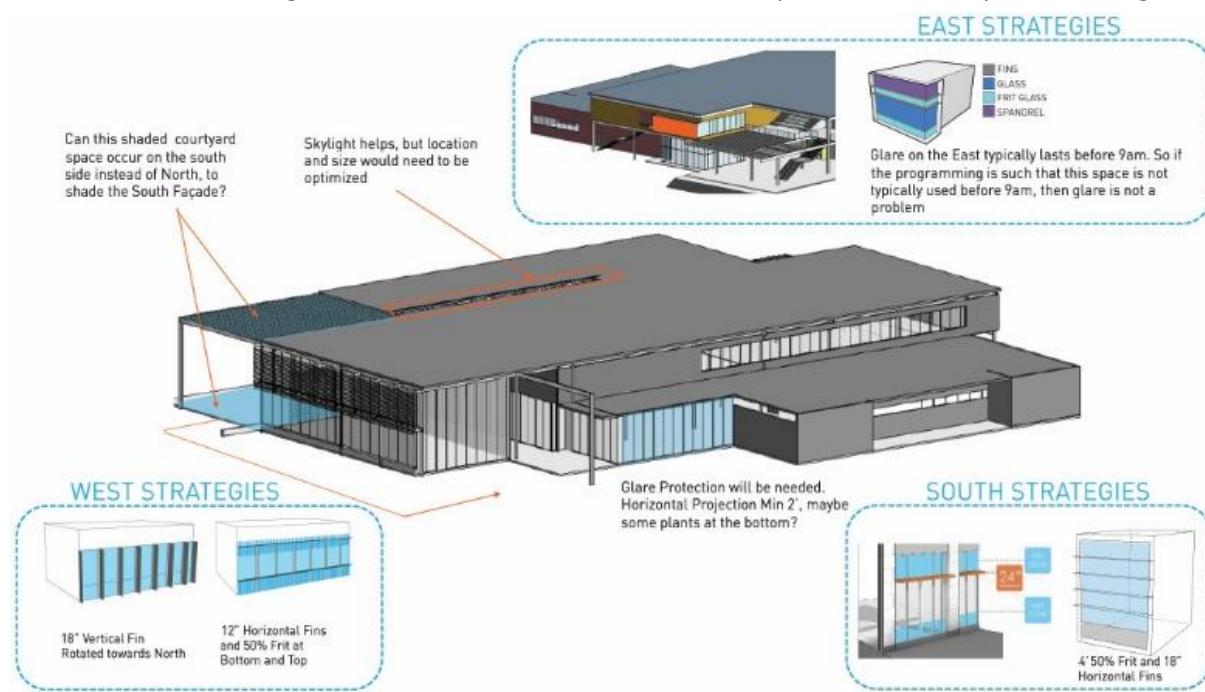


Figure 86 Étude d'éblouissement 1 : Salle d'exposition, salle du 2e étage, orientée au sud **Source :** <https://help.covetool.com/en/articles/2687528-georgia-tech-campus-center>

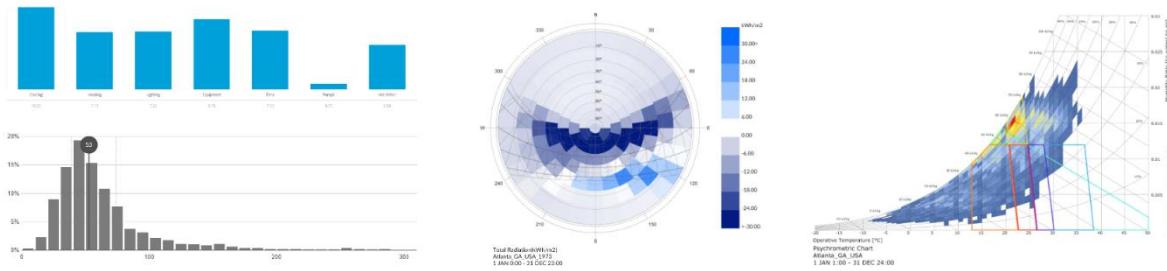
#### IV.2.4.5 Études de façades

L'étude des façades a permis de les améliorer pour plus de confort et d'efficacité énergétique. En analysant la course du soleil, ils ont pu mieux placer les fenêtres pour avoir une lumière agréable sans éblouissement, tout en ajoutant des protections solaires aux endroits trop ensoleillés. Ces modifications créent des intérieurs plus lumineux et plus frais en été, réduisant ainsi les besoins en climatisation et éclairage artificiel. Le résultat est un bâtiment plus confortable pour ses usagers et



plus économique en énergie.

Figure 87 dispositifs de façade / **Source :** <https://help.covetool.com/en/articles/2687528-georgia-tech-campus-center>



**Figure 88** diagramme cove tool sur l'analyse de façades  
Source : <https://help.covetool.com/en/articles/2687528-georgia-tech-campus-center>

#### IV.2.4.6 Analyse de l'utilisation de l'eau

Pour ce projet, l'étude a examiné non seulement les économies d'eau à l'intérieur (comme les appareils à faible débit), mais aussi son utilisation à l'extérieur, en explorant des solutions comme la réutilisation des eaux grises, la récupération de l'eau de pluie et des méthodes d'irrigation plus efficaces. Cela a permis d'optimiser la gestion de l'eau dans l'ensemble du projet.

## IV.2.5 Analyse critique

Cove.tool est un logiciel pratique qui aide à concevoir des bâtiments plus performants et durables, et qui répond aux standards de l'architecture bioclimatique. Un de ses grands atouts, c'est la création de rendus 3D simples et efficaces, qui permettent de visualiser rapidement les projets. Il se connecte aussi très bien avec d'autres outils grâce à son intégration BIM, ce qui facilite le travail d'équipe. Ce qui le rend vraiment utile, c'est sa capacité à optimiser l'efficacité énergétique et à analyser les coûts, aidant les architectes à prendre des décisions éclairées dès les premières étapes.

En revanche Cove.tool a aussi quelques défauts : son apprentissage peut être difficile au début, surtout pour ceux qui ne sont pas familiers avec les outils d'analyse énergétique. De plus, même s'il est compatible avec Revit, il peut y avoir quelques problèmes d'export ou de synchronisation, ce qui demande parfois des ajustements manuels.

Il est à signaler qu'il n'y a pas de version d'essai, et même la tarification n'est pas disponible sur leur site officiel.

Par rapport à Autodesk Forma, la différence est que Forma se concentre davantage sur la planification urbaine et les simulations environnementales (vent, ensoleillement, bruit), Cove.tool est plus spécialisé dans l'analyse énergétique et l'optimisation des coûts en phase de conception. Forma offre aussi des outils de modélisation 3D plus poussés, tandis que Cove.tool est plus axé sur la performance du bâtiment. Les deux sont complémentaires, mais le choix dépend vraiment des besoins du projet et de la disponibilité de financement.

## Conclusion du chapitre

Ce chapitre a comparé deux projets utilisant des outils IA (Autodesk Forma et Cove.tool), illustrant leur rôle dans l'optimisation architecturale. Le complexe étudiant de Malmi a démontré l'efficacité de Forma pour résoudre des contraintes urbaines (bruit, lumière), tandis que le Georgia Tech Campus Center a mis en avant Cove.tool pour une approche durable et énergétique. Les analyses critiques ont révélé les atouts et limites de chaque outil, soulignant leur complémentarité dans la conception innovante. Ces exemples confirment le potentiel de l'IA pour concilier performance et durabilité.



## V. Cas d'étude : Centre communautaire HQE

### Introduction

Ce chapitre retrace le processus complet de conception du centre communautaire, depuis l'analyse approfondie du site jusqu'à la validation des solutions finales. La démarche s'appuie sur une étude minutieuse des caractéristiques du terrain (accessibilité, topographie, nuisances environnementales) et sur l'utilisation avancée du logiciel Autodesk Forma pour optimiser la proposition architecturale.

À travers diverses simulations numériques (ensoleillement, étude des vents, analyses acoustiques et lumineuses), chaque étape de conception a pu être précisément ajustée.

### V.1 Présentation de la ville de Béjaïa

Béjaïa est une ville du nord-est de l'Algérie, située en bord de la mer Méditerranée. Elle est entourée de belles montagnes, comme le *mont Yemma Gouraya*, qui lui donnent un paysage unique.

Grâce à sa position géographique, Béjaïa est un point de rencontre important entre les villes côtières (comme Alger et Jijel) et les régions intérieures (comme Sétif et Bordj Bou Arreridj). C'est aussi un port stratégique pour le commerce.



Figure 89 situation de la ville de bejaia  
Source : Auteur

### V.2 Accessibilité

L'accès à la ville se fait par ses réseaux routiers :

- RN 24 et RN 12 : reliant Bejaïa à Tizi Ouzou,
- RN 09 : reliant Bejaïa à Jijel,
- RN 75 : reliant Bejaïa à Sétif.

Ou bien par :

- La voie ferrée,
- La voie aérienne (aéroport à vocation internationale).
- La voie maritime

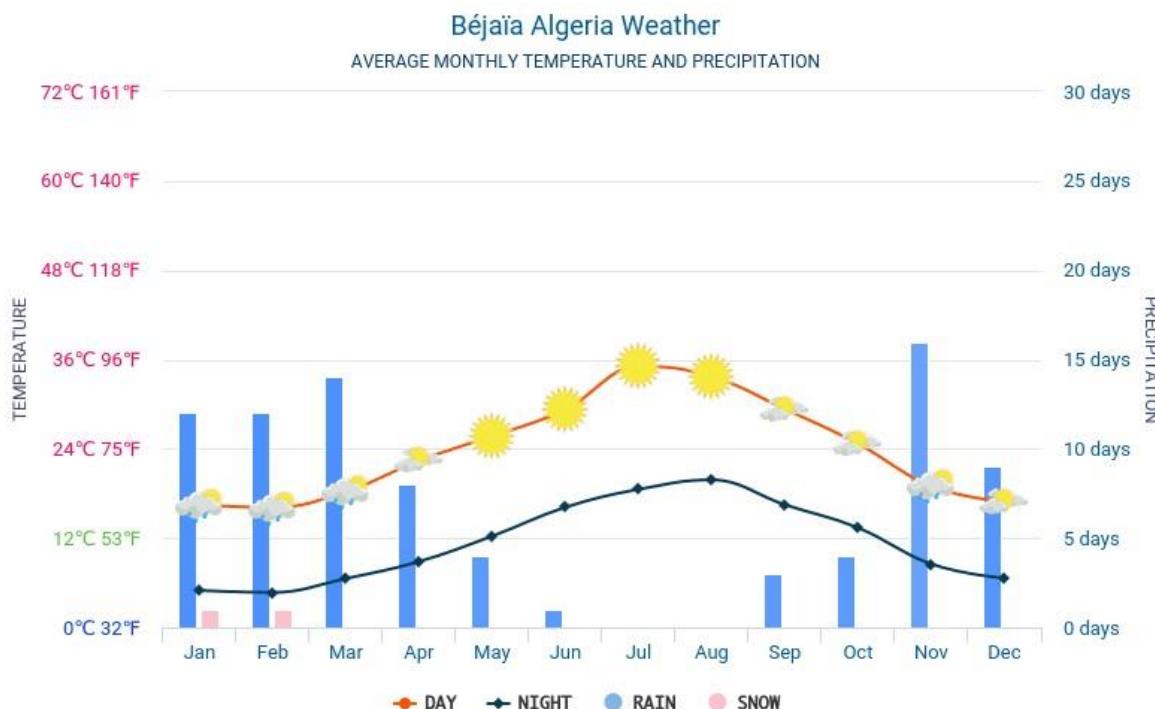


Figure 90 accessibilité  
Source: Google MAPS modifier par auteur

## V.3 Données climatiques

Béjaïa se trouve à une longitude de 2°45' Est et une latitude de 36°45' Nord. Grâce à sa position, son altitude et la proximité de la mer Méditerranée, la ville possède un climat doux et agréable.

La mer modère les températures, avec une moyenne annuelle de 17°C. L'hiver est doux, tandis que l'été peut être chaud, surtout lorsque le vent du désert (sirocco) souffle, faisant monter le thermomètre entre 30° et 40°C. La ville, bien exposée au sud, reçoit la chaleur renvoyée par les montagnes environnantes. Le *mont Gouraya* bloque quant à lui les vents du nord. Les précipitations annuelles varient entre 670 et 1000 mm en moyenne.



## V.4 La topographie

La ville de Béjaïa est entourée de montagnes, comme le mont *Yemma Gouraya*, qui domine la région et offre une vue magnifique sur la mer. Ces reliefs montagneux rendent les paysages très beaux, mais aussi un peu difficiles pour les constructions.

Près de la côte, il y a des plages et des falaises rocheuses. Le port de Béjaïa est important pour le commerce et la pêche. A l'intérieur des terres, on trouve des vallées et des forêts verdoyantes, surtout dans la région de la Kabylie. Les cours d'eau, comme l'oued Soummam, traversent la zone et apportent de l'eau pour l'agriculture.

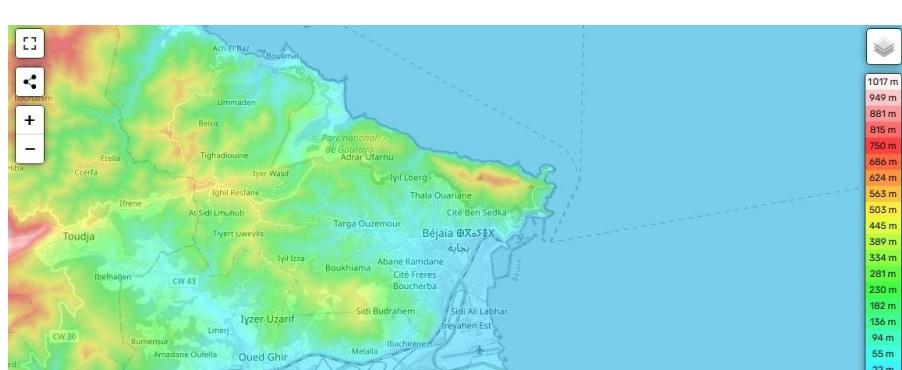


Figure 92 Carte topographique Béjaïa, altitude, relief.

Source : <https://fr.topographic-map.com/map-8fj24/B%C3%A9ja%C3%A9/>?center=36.75126%2C5.06435

## V.5 Site d'intervention

### V.5.1 Présentation et délimitation du terrain :

Contexte :

L'ancienne zone industrielle (Z.I) de Béjaïa a été créée dans les années 1960. Elle s'est développée en suivant l'axe principal de la ville, mais son expansion urbaine s'est arrêtée au niveau de la plaine, bloquée par l'Oued Sghir. Cela lui a donné une forme irrégulière.

Notre terrain est limité par :

- Nord : EPLA Bejaia
- Est : Résidence Nid d'abeille
- Sud : lotissement
- Ouest : Complexe le JUTE



Figure 93 Site intervention

Source: Auteur

**Forme** : régulière

**Surface total** : 15500 m<sup>2</sup>

**Dimensions** : 183m \* 78m

## V.5.2 Etat des lieux

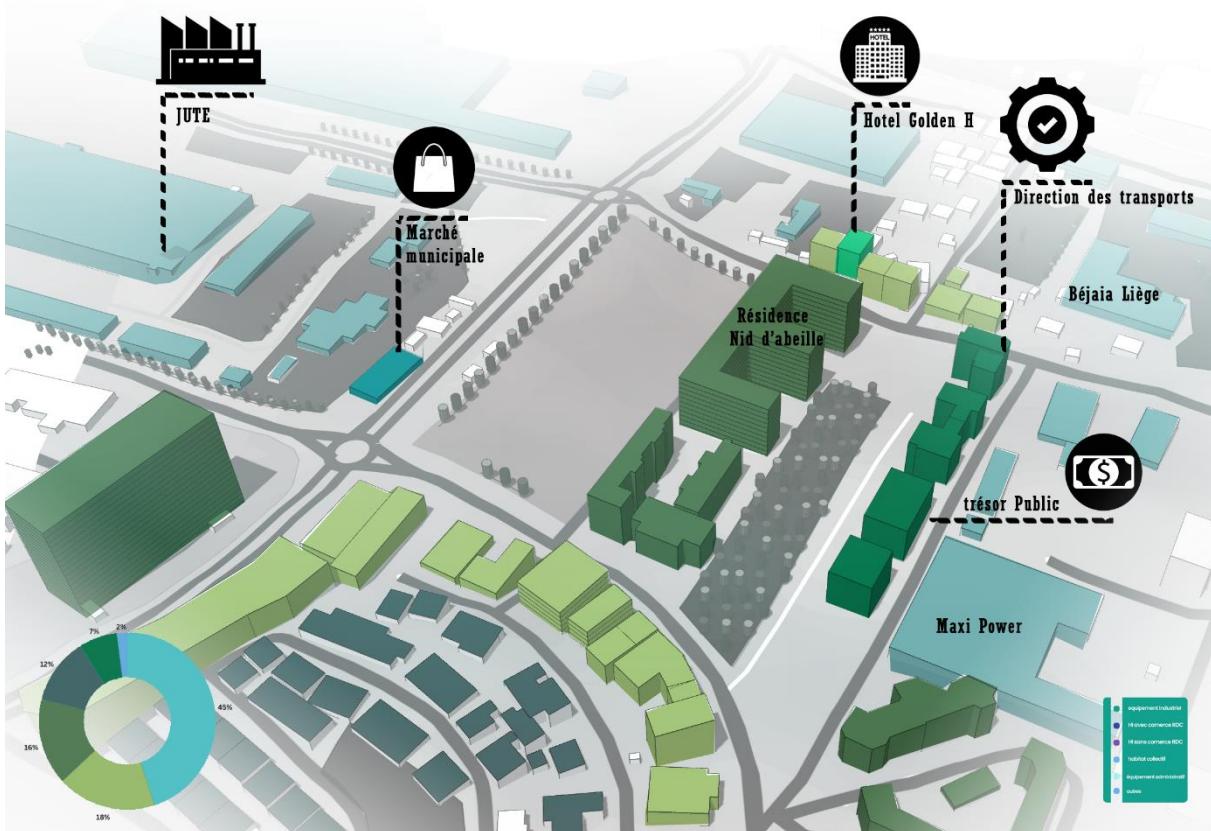


Figure 94 Etat de fait  
Source : auteur

### V.5.2.1 Constat

- La zone est dominée à 45% par des activités industrielles, tandis que l'habitat (18%) et les nouveaux projets immobiliers (16%) sont minoritaires, créant un déséquilibre dans l'usage des sols.
- Aucun parc ou zone de détente n'est aménagé, ce qui nuit à la qualité de vie des travailleurs et résidents, et accentue l'aspect "bétonné" de la zone.
- On ne trouve ni terrains de sport, ni salles polyvalentes, ni écoles dans cette zone, obligeant les usagers à se déplacer ailleurs pour ces services essentiels.
- La coexistence d'usines (45%) et d'habitations/commerces (18%) pose des problèmes de nuisances (bruit, pollution) sans offrir d'avantages urbains compensatoires.
- La non hiérarchisation des bâtiments qui a un effet négatif sur les façades urbaines
- La majorité des édifices se développent en R+ 2 et plus

### V.5.3 Accessibilité

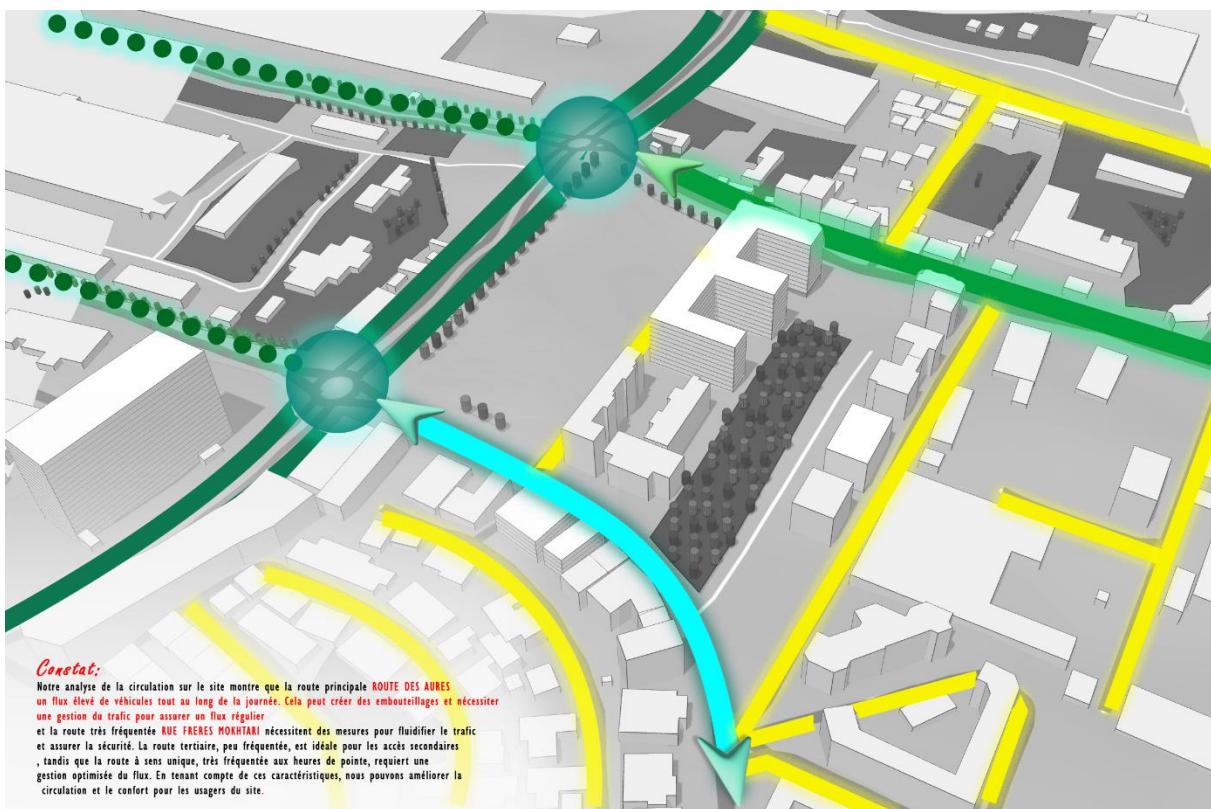


Figure 95 Accessibilité

Source: Auteur

#### V.5.3.1 Constat

Notre analyse de la circulation sur le site montre que la route principale ROUTE DES AURES accueille un flux élevé de véhicules tout au long de la journée. Cela peut créer des embouteillages et nécessiter une gestion du trafic pour assurer un flux régulier et la route très fréquentée RUE FRERES MOKHTARI nécessitent des mesures pour fluidifier le trafic et assurer la sécurité. La route tertiaire, peu fréquentée, est idéale pour les accès secondaires, tandis que la route à sens unique, très fréquentée aux heures de pointe, requiert une gestion optimisée du flux. En tenant compte de ces caractéristiques, nous pouvons améliorer la circulation et le confort pour les usagers du site.

#### V.5.4 Proposition urbaine

Étant donné que notre site d'intervention a une superficie totale de 15 500 m<sup>2</sup>, mais que la surface maximale constructible du terrain est de 3 000 m<sup>2</sup>, j'ai choisi de proposer une esquisse urbaine non détaillée. Cette approche consiste à :

- Découper le terrain en parcelles,
- Placer notre projet (le centre multifonctionnel) sur l'une d'elles,
- Préparer les autres parcelles pour une utilisation future."



Figure 96 Propositione urbaine Source: Auteur

#### Principes utiliser

- Grand espace communautaire centrale
- Grand parking qui va desservir l'ilot urbain
- Accès piétons et des pistes cyclables
- Aires de jeux pour enfants
- Des équipements culturelles et éducatifs
- Commerces au RDC des bâtiments pour dynamiser le boulevard

## V.6 De l'analyse numérique au schéma de principes : méthodologie avec Autodesk Forma

Dans cette partie, nous allons vous présenter les différentes étapes effectuées en utilisant la plateforme Autodesk Forma, ainsi que la méthode pour réaliser les analyses (ensoleillement, bruit, vents, éclairage naturel) et on va pouvoir ressortir avec des synthèses qu'on va interpréter pour concevoir notre projet de centre communautaire.

Nous interpréterons ces analyses afin d'optimiser la conception, puis nous passerons aux détails techniques du projet. Enfin, nous réaliserons une Auto-critique en comparant les résultats des différentes analyses pour évaluer la pertinence de nos choix.

### V.6.1 Crédit de compte / inscription

Pour avoir un essai gratuit de ce logiciel pendant 30 jours, il faut choisir 'utilisation à domicile'. Et pour les étudiants qui ont un projet qui demande plus d'un mois, ils ont une rubrique 'enseignement' pour une licence d'un an.



Figure 97 création de compte / Source : Autodesk FORMA

### V.6.2 Crédit de site d'intervention

Une fois l'inscription faite, il faut choisir la rubrique (créer un nouveau site) et sélectionner la zone d'intervention selon les besoins souhaités



Figure 98 création du site d'intervention / Source : Autodesk FORMA

### V.6.3 Activer les différents options (bâtiments / terrain / route / topographie)

Pour avoir un bon rendu et des analyses concrètes, il faut tout activer (routes/surfaces/bâtiments), régler les gabarits et planter la végétation existante, parce qu'elle impacte l'étude de bruit, d'ensoleillement et même les vents

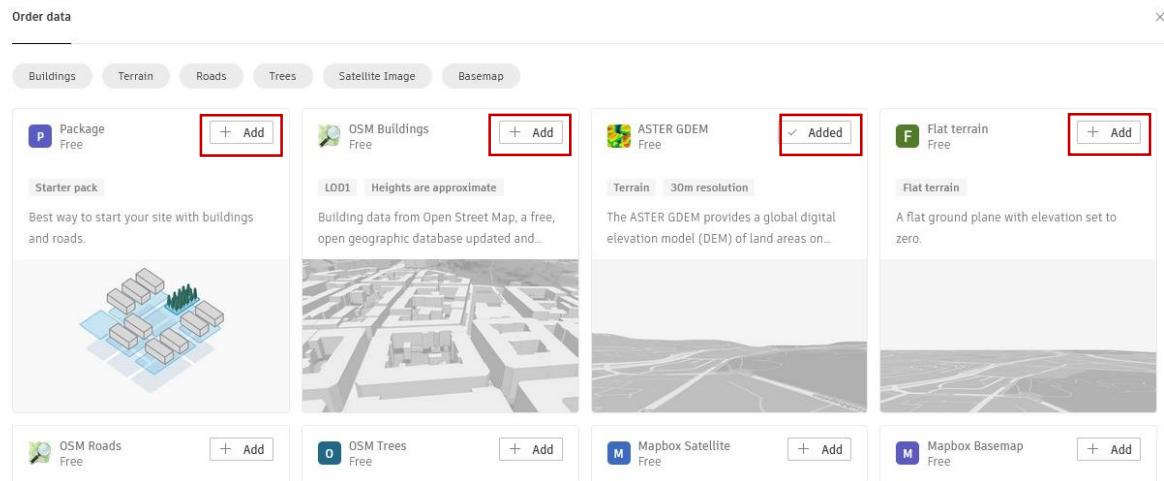


Figure 99 les différents options Autodesk forma / Source : Autodesk FORMA

### V.6.4 Interface Autodesk forma

L'interface se compose principalement de trois éléments essentiels : le premier, ce sont les outils de dessin (végétation / surface / route / bâtiment) ; le deuxième, à droite, ce sont les différentes analyses ; et à gauche, les extensions et les propositions.

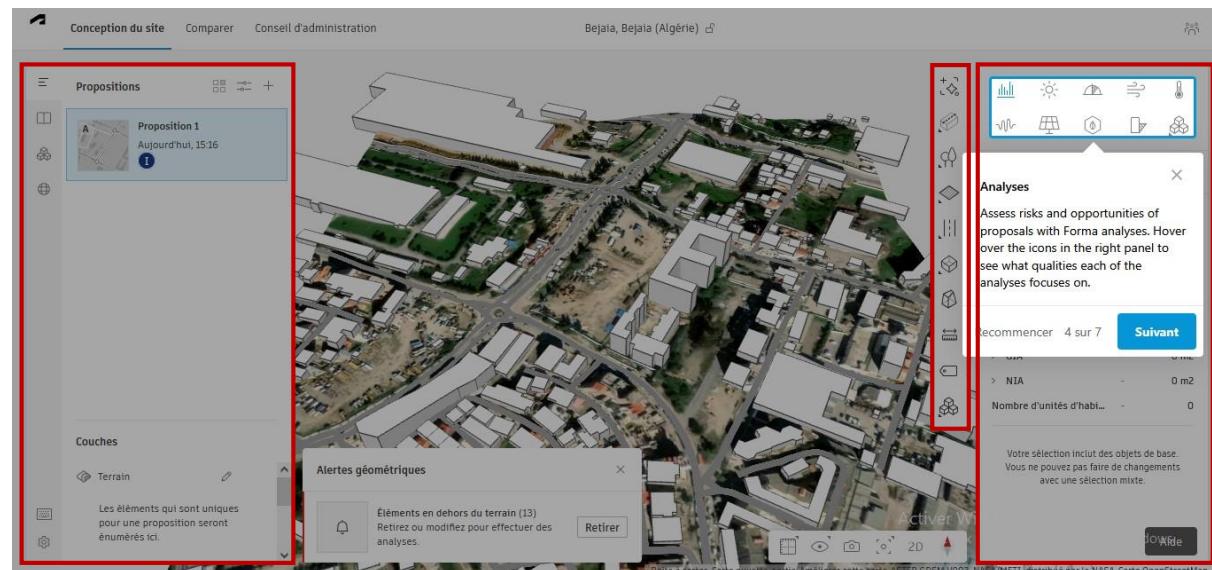


Figure 100 interface Autodesk forma / Source : Autodesk FORMA

## V.6.5 Importer la proposition urbaine

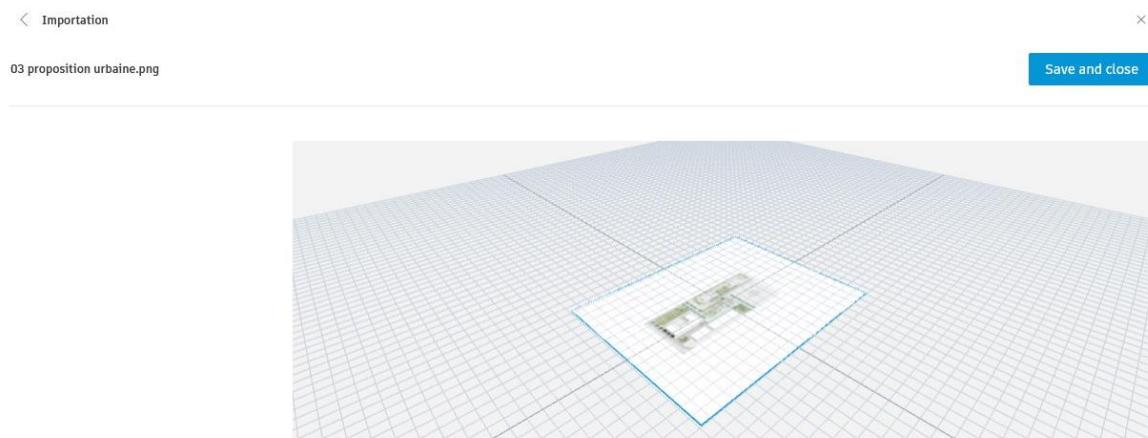


Figure 101 importation / Source : Autodesk FORMA

## V.6.6 Analyse de site

- Exécutez différentes analyses (ensoleillement, Daylight, vent, bruit) .
- Consultez les résultats d'analyse pour prendre des décisions éclairées.

### V.6.6.1 Ensoleillement

La première analyse avec laquelle on va commencer, c'est l'analyse d'ensoleillement et la durée sur laquelle notre terrain sera exposé au soleil, ce qui nous permettra de prendre beaucoup de décisions en matière de positionnement des espaces, même le pourcentage plein/vide, et les différentes orientations des espaces, et même le choix du volume et gabarit

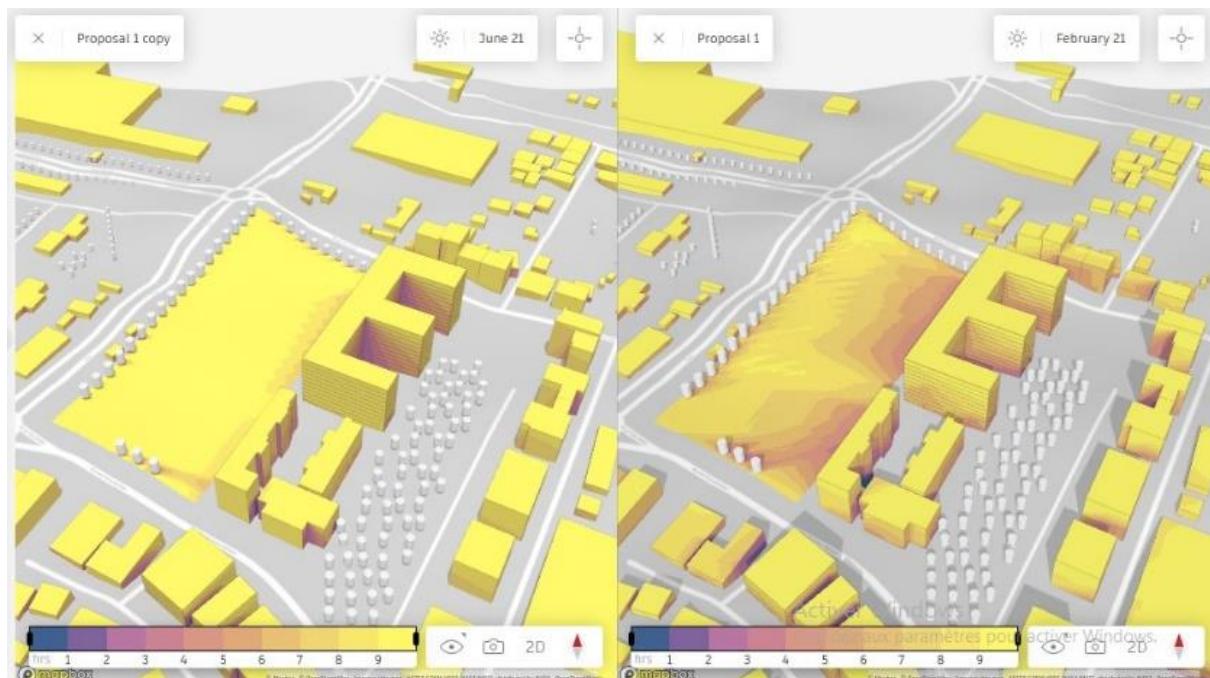


Figure 102 analyse d'ensoleillement

Source : Autodesk Forma

Modifier par auteur

## Constat

**Façades Sud** : Elles reçoivent une quantité modérée de lumière solaire en raison des bâtiments mitoyens de R+3, mais l'exposition reste suffisante pour les activités quotidiennes.

**Façades Est** : Ces façades sont partiellement ombragées par des bâtiments à forte hauteur, ce qui réduit leur exposition solaire, surtout en fin de journée.

**Façades Ouest** : Grâce à des bâtiments à faible gabarit, ces façades bénéficient d'une exposition solaire maximale, particulièrement en fin de matinée et début d'après-midi.

**Façades Nord** : Avec un espace libre au nord, ces façades reçoivent une quantité limitée de lumière solaire, principalement en fin de matinée.

### V.6.6.2 Vents

- Choisie la zone d'analyse (Périmètre de cercle)
- Choisir quelle orientation de vent qu'on veut analyser selon la rose des vents
- Activer l'outil simulation pour voir la trajectoire des vents

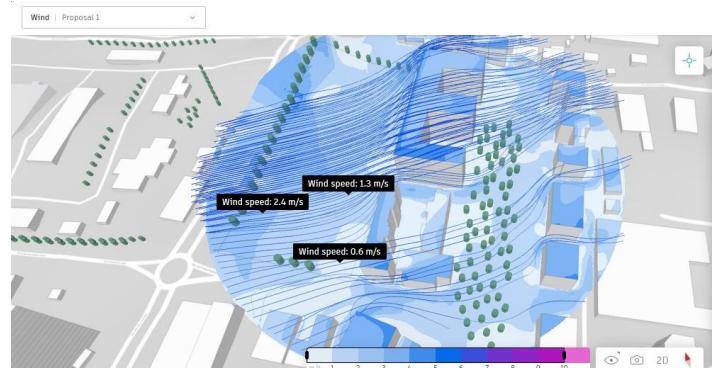


Figure 103 Analyse des vents

Source : Autodesk Forma **modifier** par auteur

## Constat

Les données montrent que les vents dominants proviennent principalement de l'ouest et du nord-ouest, une orientation essentielle pour la conception des espaces extérieurs et la disposition des bâtiments, afin de réduire les effets négatifs comme l'inconfort thermique ou les turbulences. Par ailleurs, les bâtiments adjacents de 15 étages à l'est agissent comme une barrière significative, redirigeant les flux d'air vers le sud et l'ouest. Cette redirection pourrait intensifier les vents le long de la route principale à l'ouest, impactant potentiellement le confort des piétons dans cette zone.

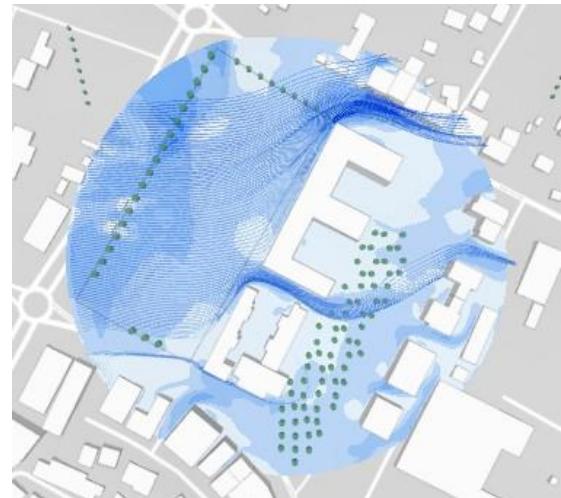


Figure 104 analyse des vents 2D

Source : Autodesk Forma **modifier** par auteur

### V.6.6.3 Potentiel d'éclairage naturel

L'analyse du potentiel d'éclairage naturel permet d'optimiser notre conception en maximisant l'apport lumineux naturel, réduisant ainsi les besoins en éclairage artificiel et les coûts énergétiques, tout en améliorant le confort des occupants.



Figure 105 Potentiel d'éclairage naturel

Source : Autodesk Forma modifier par auteur

**Constat :**

**Façade Sud :**

- Le potentiel d'éclairage naturel est maximal, ce qui est idéal pour les espaces de vie et les bureaux où la lumière naturelle est essentielle.

**Façade Ouest :**

- Un bon ensoleillement en après-midi favorise des espaces tels que les salles de réunion et les zones de détente.

**Façade Est :**

- Les bâtiments de grande hauteur projetant des ombres matinales permettent une régulation thermique efficace, parfait pour les zones nécessitant moins de chaleur.

**Façade Nord :**

- Avec un espace libre, la lumière indirecte offre une ambiance douce, idéale pour des espaces de travail créatifs ou des bibliothèques.

#### V.6.6.4 Bruit

Il permet d'étudier facilement les problèmes de bruit dans un projet de construction. L'outil montre comment le bruit de la route ou des machines peut gêner les habitants. On peut alors placer les bâtiments, choisir les matériaux ou ajouter des protections pour réduire ces nuisances.

- Activer les routes avec leurs Largeurs réel
- Paramétriser la vitesse moyenne des véhicules
- Pourcentage de Fréquentation (jour/nuit) ADT

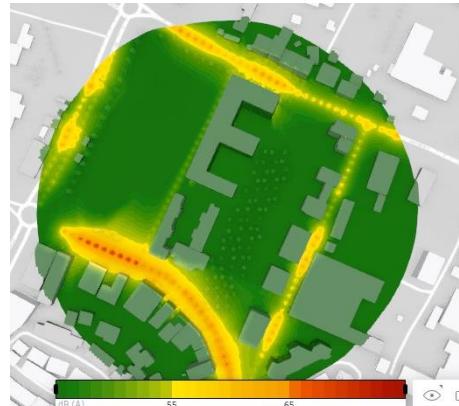


Figure 106 Analyse du bruit  
Source : Autodesk Forma

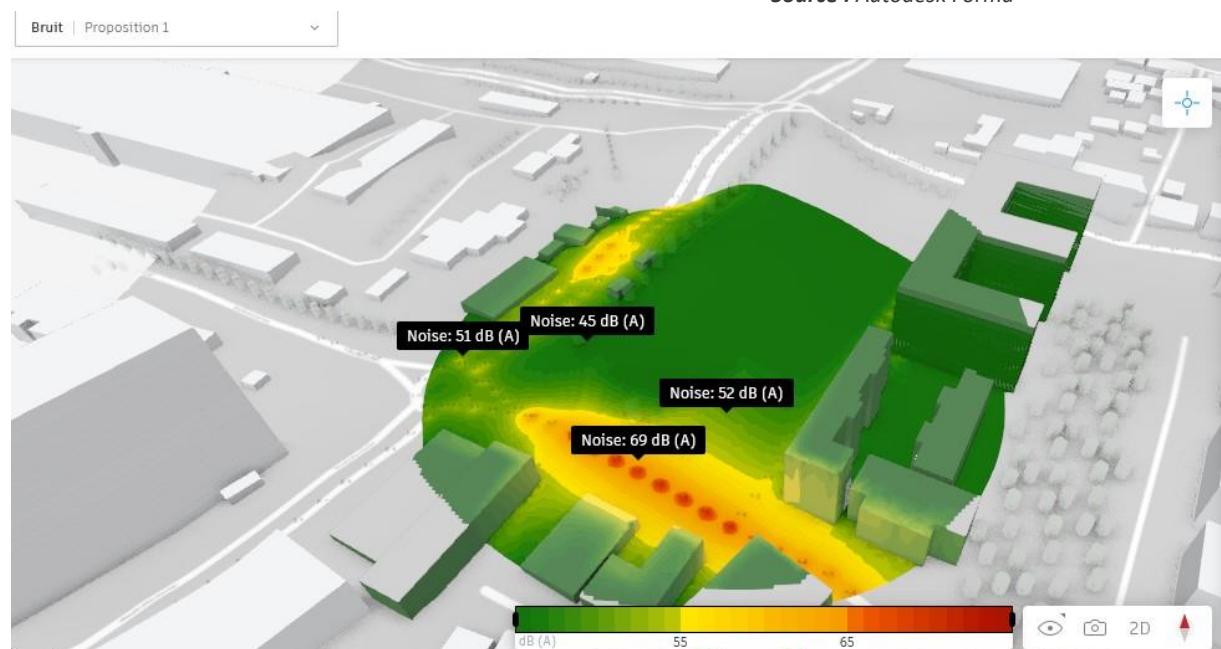


Figure 107 analyse de bruit 3D / Source : Autodesk Forma modifier par auteur

#### Constat :

- Niveaux de bruit élevés au sud : La route principale au sud, avec ses bâtiments mitoyens et son trafic intense, génère des niveaux de bruit importants 62 dB nécessitant des mesures d'atténuation.
- Impact de la route à l'ouest : La circulation rapide sur la route à l'ouest entraîne des niveaux de bruit élevés, 51db surtout aux heures de pointe, ce qui souligne la nécessité de murs antibruit et d'une disposition stratégique des espaces intérieurs.
- Rôle des bâtiments à l'est : Les bâtiments de 15 étages à l'est agissent comme une barrière naturelle contre le bruit 40 dB, offrant une protection précieuse pour le site.

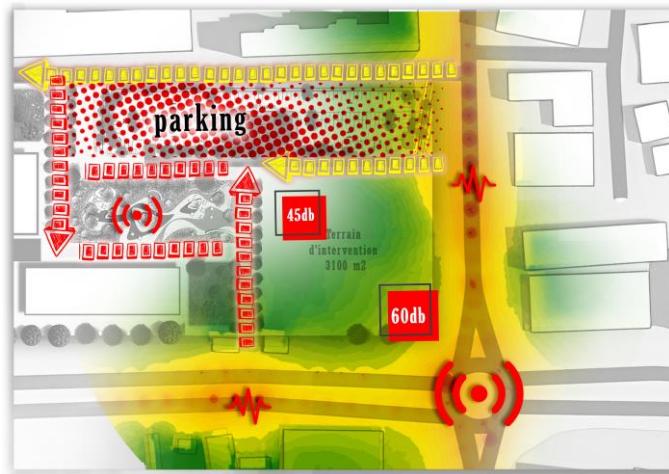
### V.6.6.5 Energie solaire

Les bâtiments adjacents de 15 étages à l'est génèrent des ombres significatives, réduisant l'ensoleillement direct, surtout le matin. En revanche, les bâtiments à faible gabarit à l'ouest ont un impact minimal sur l'exposition solaire, permettant une bonne capture de l'énergie solaire en fin d'après-midi. Par ailleurs, les toits des bâtiments représentent une ressource précieuse pour l'installation de panneaux solaires, avec un potentiel de production allant jusqu'à 1800 kWh/m<sup>2</sup>. Cette opportunité permet de maximiser la production d'énergie renouvelable et de réduire la dépendance aux énergies fossiles.



### V.6.7 Synthèse circulation + bruit

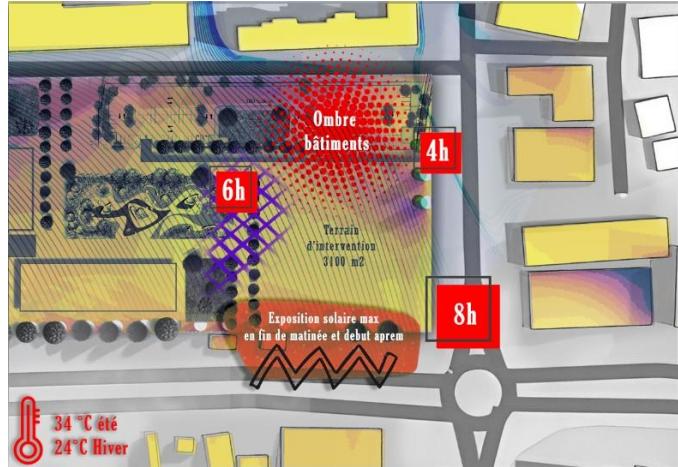
Les routes à fort trafic à l'ouest et au sud de l'îlot urbain génèrent des niveaux élevés de bruit et de pollution. L'implantation de murs antibruit, de barrières végétales, et de bâtiments tampon, ainsi que l'utilisation de matériaux isolants, sont essentielles pour atténuer ces impacts et créer un cadre de vie agréable et calme pour les résidents



## V.6.8 Synthèse données climatiques

Températures maximales de 34°C en été et des températures minimales de 7 °C en hiver, nécessitant une isolation thermique adaptée pour maintenir un confort intérieur.

La façade sud reçoit le plus d'ensoleillement direct, optimisant ainsi l'utilisation de panneaux solaires et réduisant les besoins en chauffage en hiver et les vents dominants viennent du nord-ouest, Permettant une ventilation naturelle efficace en ouvrant des fenêtres stratégiquement placées pour assurer une circulation d'air optimale.



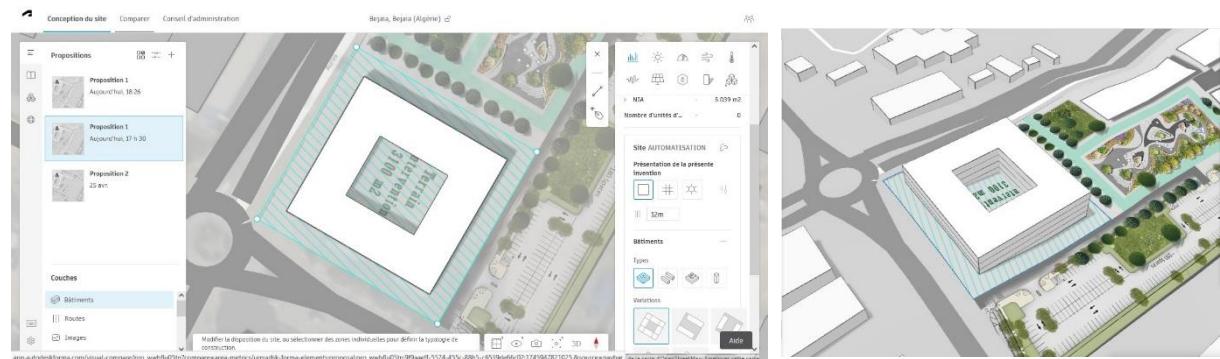
## V.6.9 Les décisions à prendre

Après avoir analysé notre site d'intervention en utilisant la plateforme "Autodesk Forma", nous avons pu aboutir à des synthèses et des propositions dans plusieurs aspects du projet :

- Nous devons avoir une occupation totale de la parcelle pour permettre d'avoir une cour centrale dans le projet qui va jouer le rôle d'articulation du projet, où nous allons rappeler la trame bleue et verte.
- Sachant que notre projet s'articule autour de trois entités : Santé / Loisir & Sport / Culture & Socialisation –, chaque entité sera séparée des autres, mais elles seront articulées entre elles avec des passerelles.
- L'entité "Santé" sera placée sur le grand boulevard côté ouest, et l'entité "Détente et Loisir" sera exposée au côté sud, où nous allons continuer l'axe commercial. Elle donnera sur la grande source de bruit au niveau du nœud. Quant à la dernière entité, "Culture et Socialisation", comme elle recherche le calme et l'isolement, nous avons décidé de la mettre du côté nord, où elle donne sur le grand jardin ou la nuisance sonore et nulle.
- Nous allons avoir des toits-terrasses, et même les coursives joueront un rôle majeur dans le projet, car elles seront aménagées et végétalisées.
- Placer des panneaux solaires sur les toits non accessibles.
- Planter de grands arbres saisonniers dans les directions où nous avons des vents dominants gênants.)

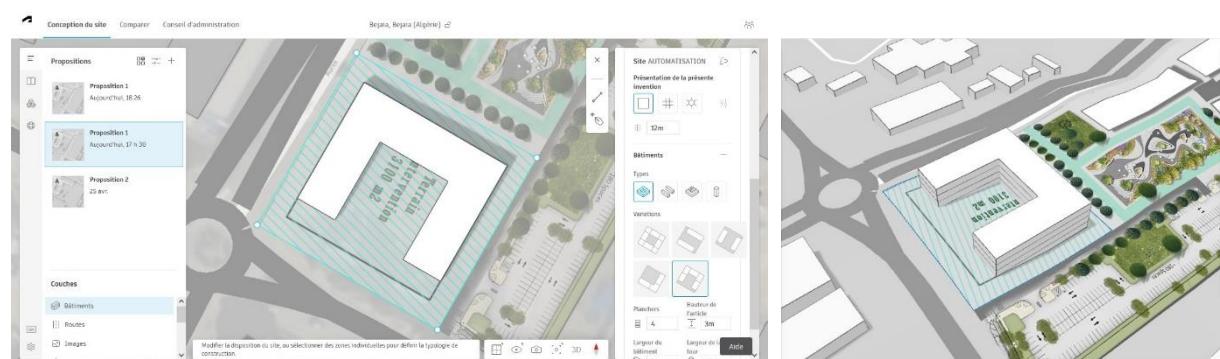
## V.6.10 Crée des propositions de conception :

Dans cette étape, on va créer plusieurs propositions de volumes, soit manuellement, soit en utilisant l'outil IA (site automatique), afin de répondre au maximum d'analyses effectuées avec cette plateforme et faire des comparaisons entre les différents volumes. Par exemple, pour mon cas, j'ai fait trois propositions (occupation totale avec cour centrale / volume en forme de U / deux barres linéaires parallèles)



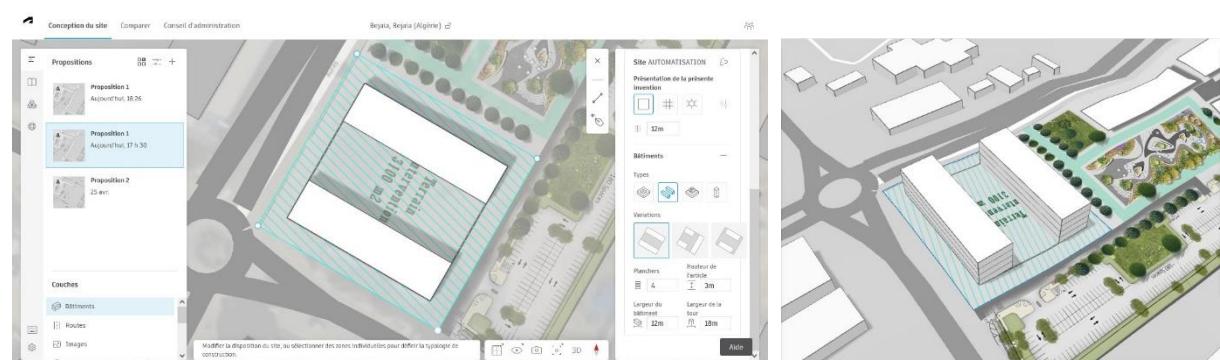
**Figure 111 Proposition 01 Source : Autodesk Forma modifier par auteur**

Occupation totale avec cour centrale : Un seul grand volume regroupant toutes les fonctions, avec un espace ouvert au centre pour apporter de la lumière et de la ventilation naturelle.



**Figure 112 proposition 02 Source : Autodesk Forma modifier par auteur**

Volume en forme de U : Trois bâtiments disposés en U autour d'une cour, offrant un équilibre entre espaces partagés et zones plus privées, tout en gardant une bonne circulation d'air.

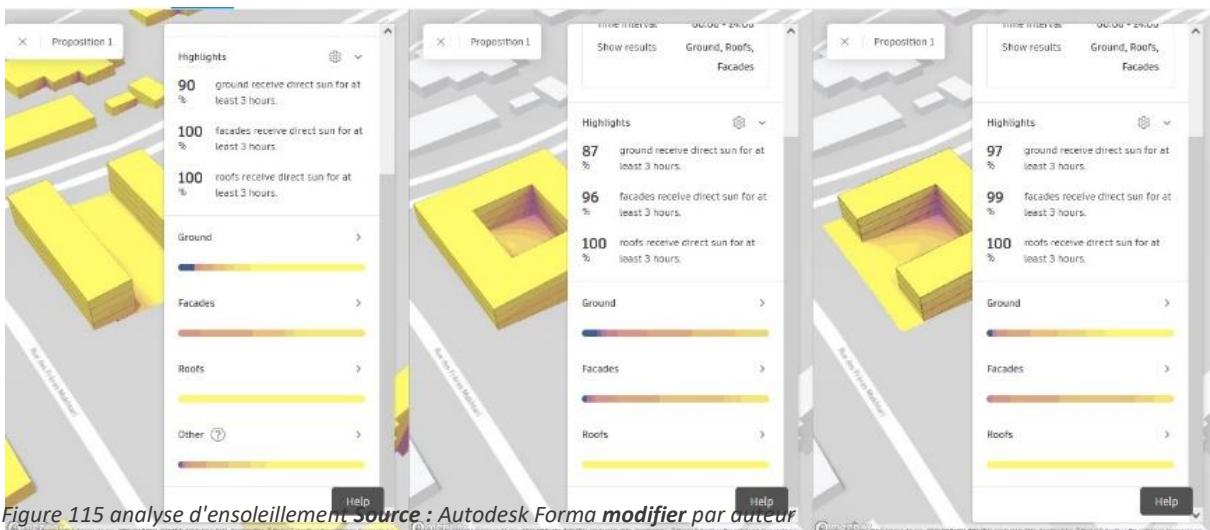


**Figure 113 proposition 03 Source : Autodesk Forma modifier par auteur**

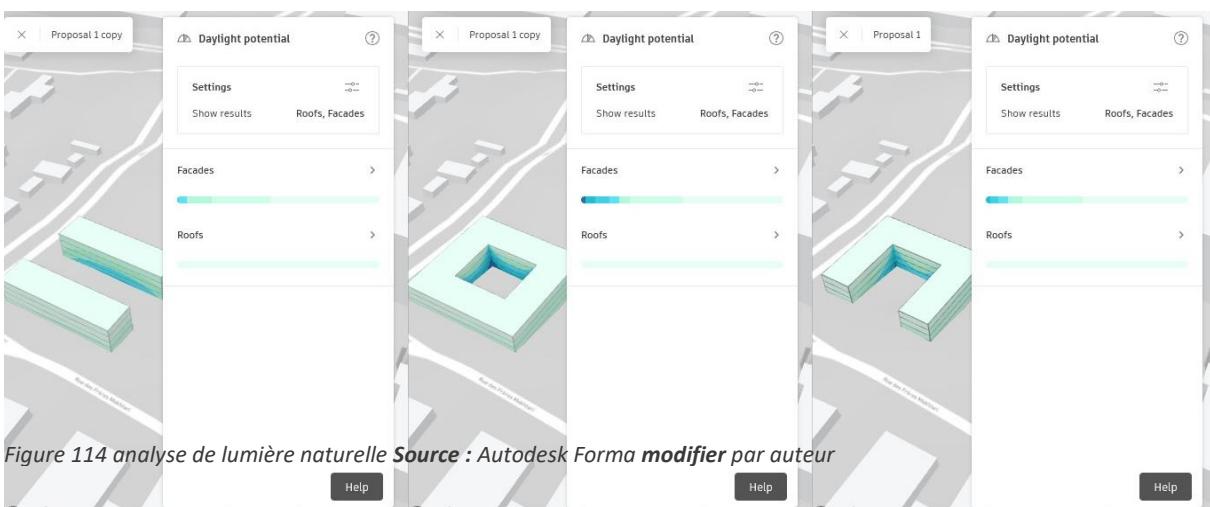
Deux barres linéaires parallèles : Deux bâtiments allongés placés côté à côté, créant une voie centrale tout en permettant une organisation claire et une séparation possible des fonctions.

## V.6.11 Comparer les différents propositions

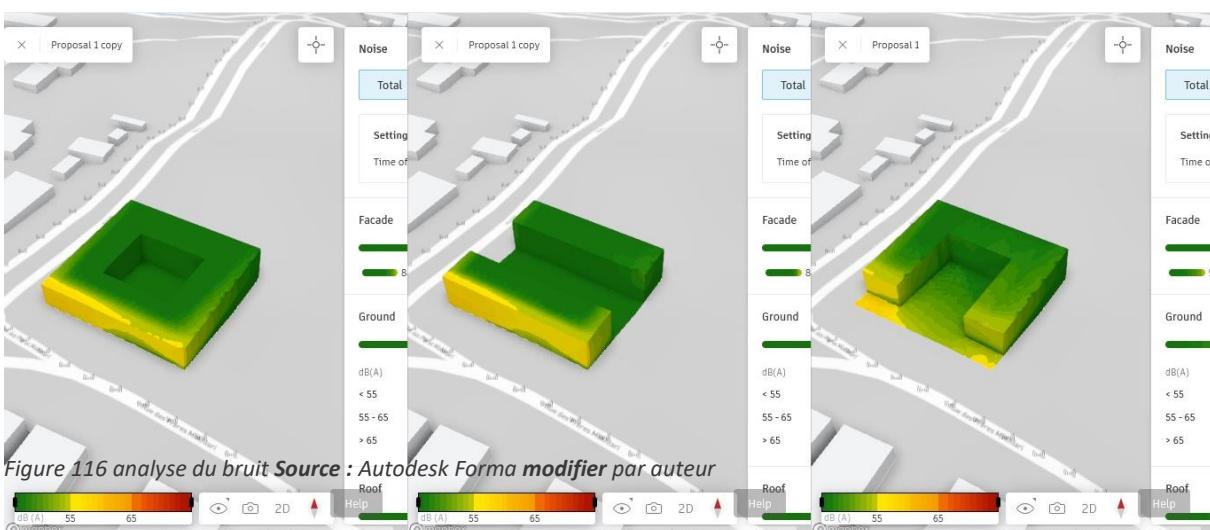
### Comparaison (analyse d'ensoleillement)



### Comparaison (analyse de lumière naturelle)



### Comparaison (analyse de bruit)



## Comparaison (analyse de microclimat)



Figure 118 analyse de microclimat Source : Autodesk Forma modifier par auteur

## Comparaison (analyse des vents)

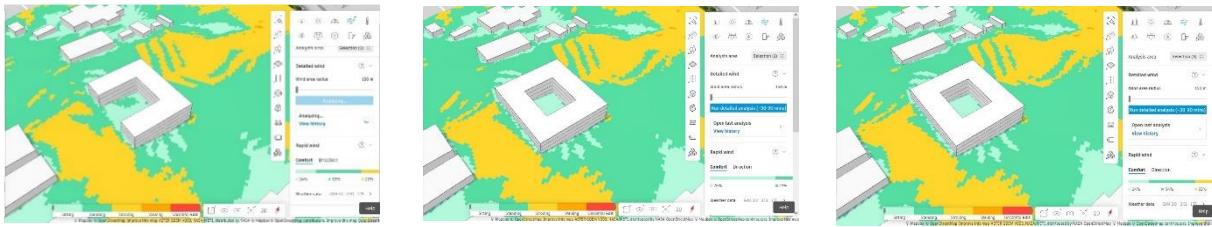


Figure 117 analyse des vents Source : Autodesk Forma modifier par auteur

### V.6.11.1 Synthèse et choix

Après avoir analysé les différents résultats de comparaison entre les trois volumes selon tous les aspects proposé (vents / ensoleillement / microclimat / éclairage naturel...) et même le côté formel et esthétique qui va s'adapter à notre site d'intervention, notre choix s'est porté sur le volume n°01 : occupation totale avec une cour centrale, pour les raisons ci-dessous

- La cour centrale favorise la ventilation naturelle et un bon ensoleillement, améliorant le microclimat du bâtiment.
- La disposition permet une répartition homogène de la lumière dans les espaces, réduisant le besoin en éclairage artificiel.
- La forme s'intègre bien au terrain tout en offrant une architecture harmonieuse et fonctionnelle.
- La forme nous permet de faire une bonne répartition des espaces toute en offrant des zones tampon d'articulation

## V.7 Schéma de principes

Le projet s'organise autour d'une cour centrale, avec quatre volumes séparés par des espaces de circulation. Chaque volume a une fonction précise : santé, loisir, sport, et culture/socialisation. Les formes des bâtiments s'adaptent au climat et au contexte environnant. Une bande végétale entoure le site pour réduire le bruit et protéger du soleil direct au sud. L'entrée principale est marquée par un point clé (le nœud) donc on la placée à l'angle, pour créer une ouverture visuelle vers l'extérieur

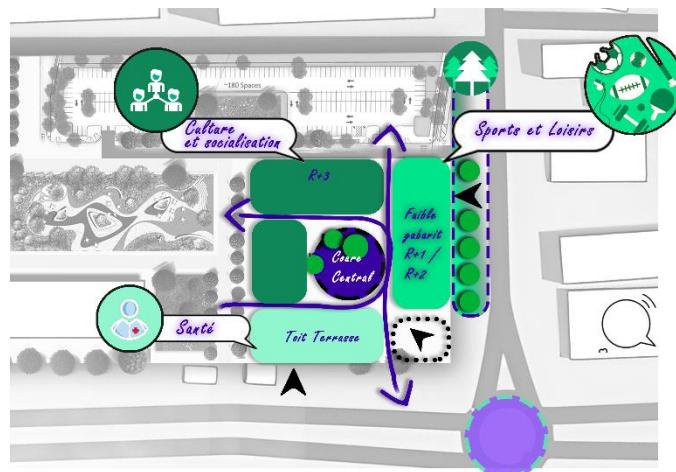
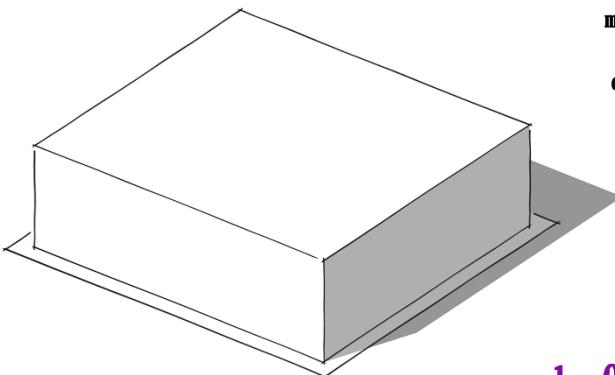


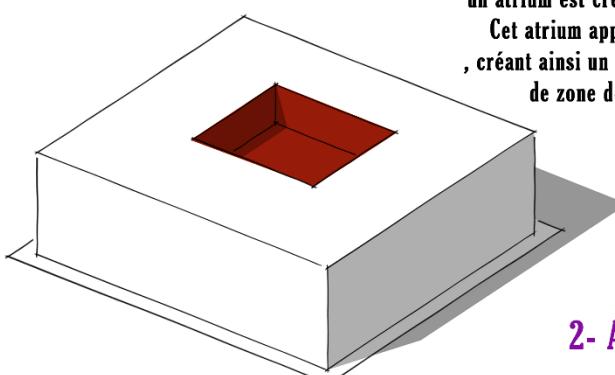
Figure 119 schéma de principes  
Source : auteur

## V.8 Genèse



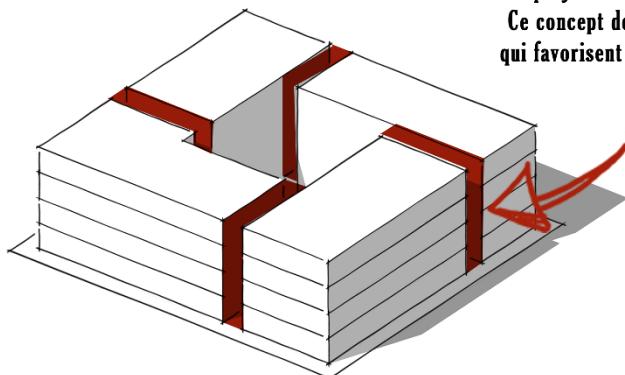
maximisant ainsi l'utilisation de l'espace disponible.  
Cette configuration permet une organisation efficace des différentes fonctions du bâtiment et une optimisation des circulations.

### 1 - Occupation Total de la parcelle



un atrium est créé pour servir de point focal et de cœur du bâtiment.  
Cet atrium apporte de la lumière naturelle et favorise la ventilation , créant ainsi un espace de vie agréable et convivial. Il sert également de zone de transition entre les différentes parties du bâtiment.

### 2- Atrium / espace dentrale du projet Centralité / noyau

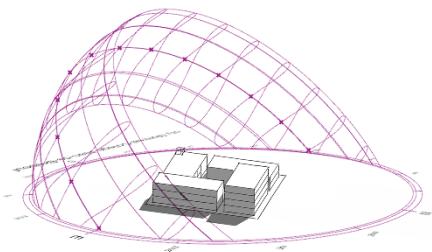
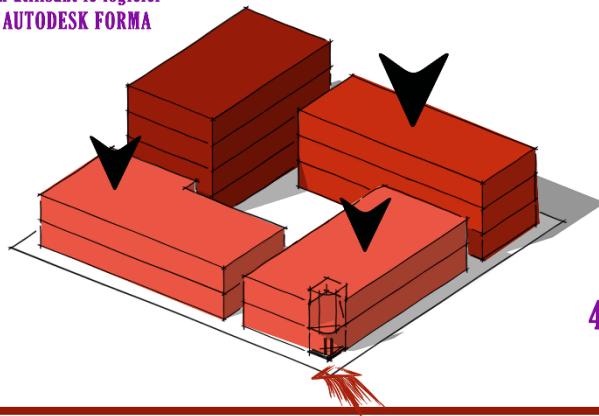


Le projet est divisé en quatre volumes séparés par des interstices. Ce concept de porosité permet de créer des espaces intermédiaires qui favorisent la circulation de l'air et l'accès à la lumière naturelle.

Interstices

### 3- Concept de la porosité

En utilisant le logiciel  
AUTODESK FORMA



### 4- jeu de volume selon l'orientation + exposition au bruit extérieur

## V.9 Concepts et logo

Le centre communautaire Kaizen (qui signifie "amélioration continue") s'inspire des maisons japonaises avec un espace central convivial, favorisant les échanges et la vie collective. Le projet intègre des principes bioclimatiques pour un confort naturel, en optimisant la lumière, la ventilation et les espaces verts. Avec une certification HQE (Haute Qualité Environnementale), il répond aux défis du site en réduisant les nuisances, en créant des zones ombragées et en renforçant le lien social. Ainsi, Kaizen améliore le tissu urbain tout en s'adaptant aux besoins des habitants



Figure 120 Logo du projet  
Source : Auteur

AUJOURD'HUI	DEMAIN
改 <small>KAI = CHANGEMENT</small>	改善 <small>KAIZEN = AMÉLIORATION CONTINUE</small>
善 <small>ZEN = BON</small>	



## V.10 Les principes bioclimatiques

- Brise soleil vertical
- Toiture végétalisée
- Tri sélective des déchets
- Les bâis vitrés
- Eclairage zénithales
- Espaces verts et végétations

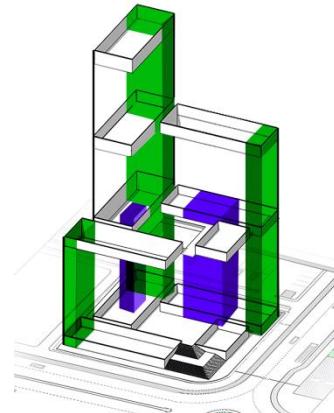


Figure 121 Les principes bioclimatiques

Source : auteur

## V.11 Préprogramme

Le centre communautaire Kaizen se répartit sur quatre niveaux, chacun dédié à des fonctions spécifiques. Au rez-de-chaussée, un centre de santé avec deux entrées (vers la route et la cour centrale) côtoie un grand restaurant ouvert sur deux façades, une salle d'arts martiaux et la cour centrale, cœur convivial du projet. Au premier étage, l'entrée principale mène à un espace d'accueil, une garderie pour enfants, une salle de gym, un coin détente et une terrasse. Le deuxième étage accueille une ludothèque et une bibliothèque, avec une coursive aménagée pour la circulation. Enfin, le dernier étage est dédié à la gestion et logistique du projet, accompagné d'une grande terrasse végétalisée offrant une vue apaisante et un espace vert en hauteur.



### Santé :

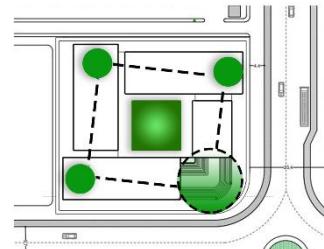
- 1 centre medicale enfant
- 2 salle d'attente
- 3 reception
- 4 salle d'examen
- 5 sanitaire
- 6 escalier
- 7 labo
- 8 salle de radio

### Sport et détente :

- 9 GYM
- 10 salle arts martiaux
- 11 terrain basket / tennis
- 12 vestiaire
- 13 café
- 14 restaurant

### culture et socialisation

- 15 salle de lecture
- 16 bibliothèque
- 17 salle multifonctionnelle
- 18 salle de prière



## V.12 Simulations et performances : Étude du projet sous Forma

Sachant que dans la plateforme Autodesk Forma, on peut importer notre volume de projet sous forme OBJ directement depuis ArchiCAD pour lancer les différentes simulations et analyses. Cela permet d'identifier les lacunes et problèmes du projet, puis de proposer des solutions, que ce soit sur le plan énergétique ou même fonctionnel.

### V.12.1 Analyse d'ensoleillement

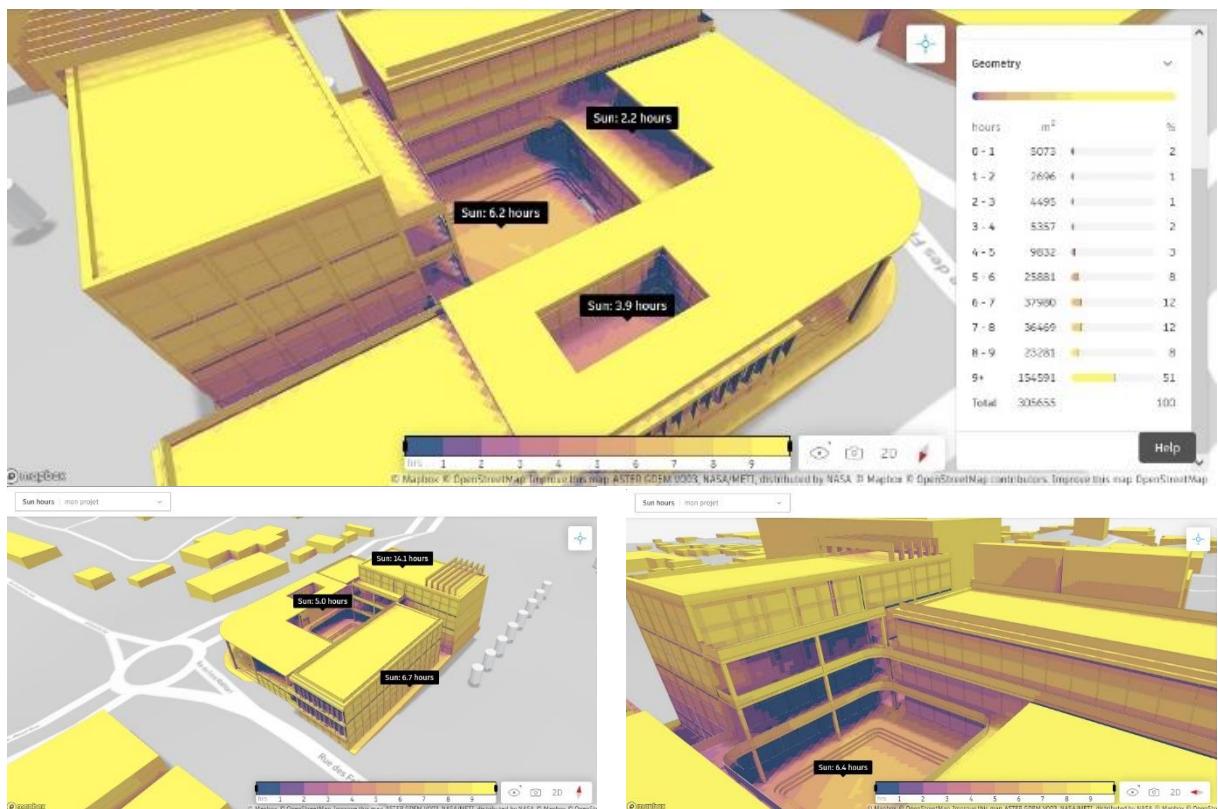


Figure 122 Analyse d'ensoleillement projet Kaizen // Source : Autodesk Forma **modifier** par auteur

#### V.12.1.1 Constat

Notre étude solaire a permis d'optimiser l'orientation des façades sud et ouest, équipées de baies vitrées et de brise-soleil ajustables pour maîtriser les apports lumineux et thermiques. Les toits-terrasses, bénéficiant de 14 heures d'ensoleillement, sont conçus pour capter l'énergie solaire, tandis que les espaces sensibles (comme la terrasse de la garderie) sont ensoleillés mais partiellement ombragés pour protéger les enfants lors des chaleurs extrêmes. Les zones ombragées (coursives, terrasses) améliorent le confort des usagers, illustrant comment l'analyse solaire guide des solutions équilibrées entre performance énergétique et bien-être.

## V.12.2 Analyse d'éclairage naturel



Figure 123 Analyse d'éclairage naturel projet Kaizen // Source : Autodesk Forma modifier par auteur

### V.12.2.1 Constat

L'étude de l'éclairage naturel a guidé la conception des grandes baies vitrées au sud et à l'ouest, maximisant la lumière tout en évitant l'éblouissement grâce aux brise-soleil ajustables 34- 36 %. Les espaces de convivialité (restaurant / terrasses) profitent ainsi d'une lumière abondante mais contrôlée, réduisant le besoin en éclairage artificiel. Les coursives et zones communes intègrent des ouvertures stratégiques pour une répartition homogène de la lumière, tout en maintenant des zones d'ombre pour le confort visuel. Cette approche équilibre apports lumineux, économie d'énergie et bien-être des usagers.

## V.12.3 Analyse de performance énergétique

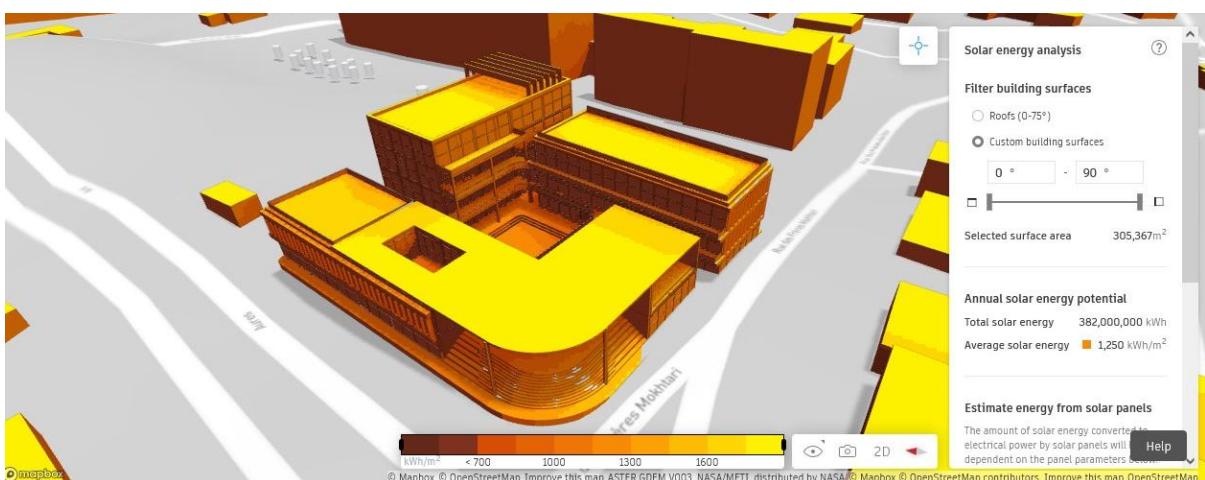


Figure 124 Analyse de performance énergétique projet kaizen // Source : Autodesk Forma modifier par auteur

### V.12.3.1 Constat

Dans notre projet, la meilleure surface pour installer des panneaux solaires est le toit du dernier volume, où se trouve la bibliothèque. Cette zone bénéficie d'un ensoleillement optimal, avec une capacité pouvant atteindre 1 600 kWh/m<sup>2</sup>/an.

## V.12.4 Analyse de bruit

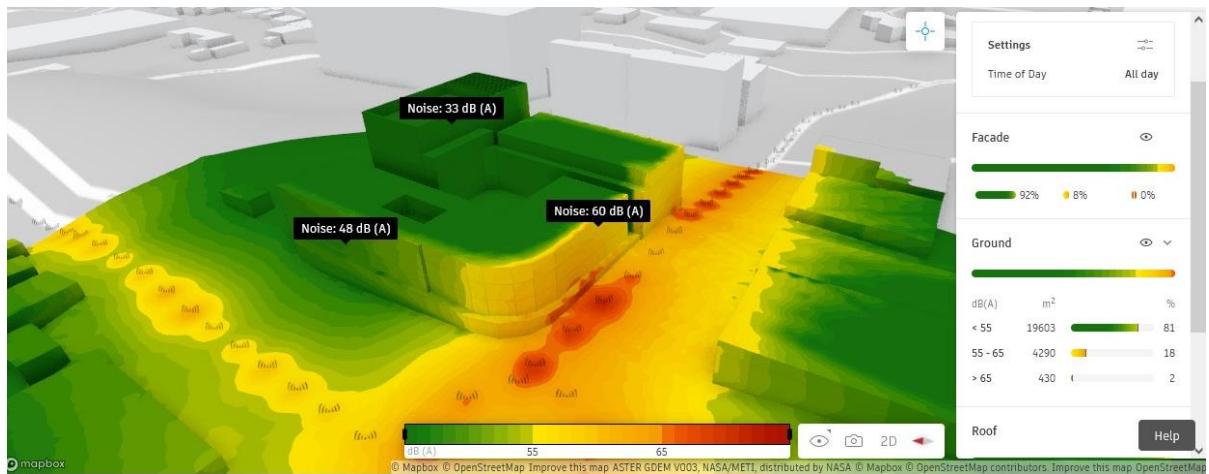


Figure 125 Analyse de bruit projet kaizen / Source : Autodesk Forma modifier par auteur

### V.12.4.1 Constat

Notre étude acoustique a guidé la répartition des espaces en fonction des nuisances sonores. Les façades sud et ouest, exposées aux sources de bruit majeures (rue Frères Tabet, route des Aurès, rond-point et arrêt de bus), accueillent les activités moins sensibles au bruit : santé, restaurant, terrasses et espaces sportifs. À l'inverse, les zones requérant du calme — bibliothèque, ludothèque, espace de convivialité et logistique — ont été positionnées à l'est (côté parking) et au nord (côté parc), dans les étages supérieurs, bénéficiant ainsi d'une isolation naturelle contre les bruits extérieurs. Cette organisation optimise le confort acoustique des usagers tout en exploitant judicieusement les contraintes du site.

## V.12.5 Analyse de vent

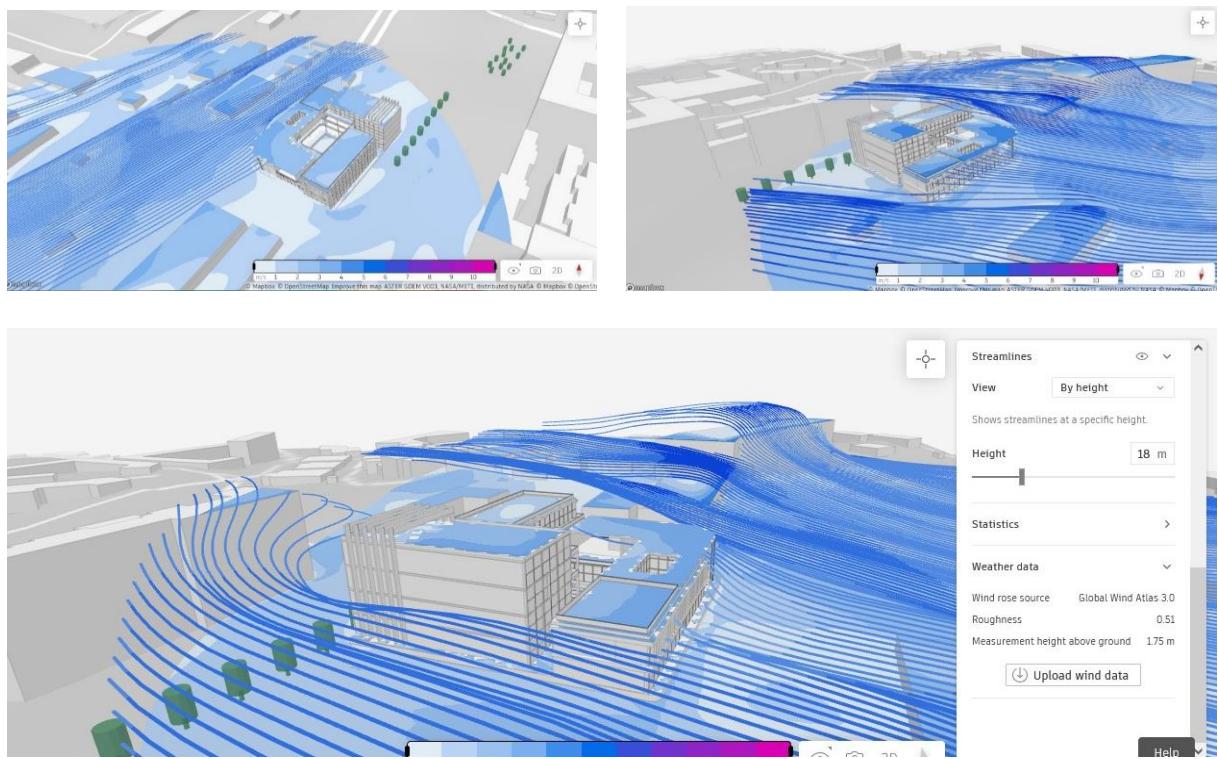


Figure 126 analyse des vents projet kaizen / Source : Autodesk Forma modifier par auteur

### V.12.5.1 Constat

Les vents dominants provenant du Sud-Ouest (27% d'occurrence) ont été un paramètre clé dans notre conception bioclimatique. Cette orientation a guidé plusieurs choix stratégiques :

- Les façades Sud et Ouest, déjà exposées au bruit routier, intègrent des brise-vent végétalisés et des auvents pour filtrer les vents tout en réduisant les nuisances sonores.
- Les espaces de vie (restaurant, terrasses) profitent des vents pour une aération passive, tandis que les zones calmes (bibliothèque au Nord-Est) sont préservées des courants d'air directs.
- La forme en entonnoir évasé de la cour réduit les turbulences, évitant les effets de tourbillon désagréables.
- Des fontaines ou bassins stratégiquement placés amplifient l'effet de fraîcheur par évaporation lors des vents chauds.
- 

### V.12.6 Analyse de microclimat



Figure 127 analyse de microclimat projet kaizen / Source : Autodesk Forma modifier par auteur

### V.12.6.1 Constat

L'étude révèle un impact marqué de la végétation sur le confort thermique : la cour centrale, densément végétalisée, maintient une température fraîche autour de 15°C, créant un îlot de fraîcheur naturel grâce à l'ombrage et à l'évapotranspiration des plantes. À l'inverse, les espaces minéraux non accessibles (comme certaines terrasses techniques) atteignent jusqu'à 23°C, illustrant l'effet "îlot de chaleur urbain". Cet écart de 8°C démontre l'efficacité des solutions passives (végétation, matériaux perméables) pour réguler le microclimat.

## Conclusion du chapitre

Le projet démontre comment l'IA peut optimiser la conception bioclimatique. Les résultats valident son utilité pour des bâtiments durables, tout en soulignant la nécessité d'un équilibre entre technologie et créativité humaine.

## VI. Conclusion générale

Cette étude explore l'influence des outils d'intelligence artificielle sur la pratique architecturale contemporaine. Nous avons analysé de manière systématique l'intégration de ces technologies dans les différentes phases du processus de conception, depuis l'esquisse préliminaire jusqu'au développement technique. L'objectif principal était d'évaluer comment ces innovations numériques transforment les méthodologies de projet et, plus fondamentalement, de questionner leur capacité à se substituer au rôle créatif et décisionnel de l'architecte.

Nous avons pu exposer une trentaine de logiciels les plus fréquents et utilisés, classés selon plusieurs catégories telles que l'analyse du site, la génération de plans, la modélisation 3D, l'architecture d'intérieur, et bien d'autres.

Ces logiciels offrent des avantages majeurs pour la conception architecturale. Ils permettent une génération rapide d'esquisses en quelques secondes, accélérant ainsi les phases de préconceptions. Les outils IA traitent efficacement les données climatiques, structurelles et urbaines pour proposer des solutions avancées. Ils automatisent les tâches répétitives tout en permettant une personnalisation des designs adaptés aux besoins spécifiques des usagers. Grâce aux simulations environnementales, ils améliorent les performances thermiques, facilitent le choix de matériaux bas carbone et intègrent intelligemment la végétation via des modèles prédictifs. Enfin, les plateformes collaboratives intégrant l'IA améliorent significativement le travail d'équipe.

Ensuite, nous avons traité le rôle de l'intelligence artificielle dans le développement de l'architecture bioclimatique et durable, en présentant deux exemples de projets réalisés à l'aide de deux logiciels : **Cove.Tool** (Georgia Tech Campus Center), qui est actuellement le meilleur logiciel d'IA pour la performance énergétique à l'échelle architecturale, et **Autodesk Forma** (Complexe de logements étudiants à Malmi). Ce dernier permet d'effectuer des analyses à l'échelle urbaine et même de comparer différentes simulations. Bien que payant, il existe un abonnement annuel gratuit pour les étudiants. Nous avons ainsi utilisé ce logiciel dans le processus de conception de notre projet d'atelier (centre communautaire HQE), où il nous a été particulièrement utile pour réaliser différentes analyses de site en temps réel et les interpréter afin de proposer les meilleures décisions à prendre lors du schéma de principe, mais aussi après avoir choisi la forme et développé partiellement la volumétrie.

Nous avons intégré ce dernier dans cette plateforme et relancé les différentes analyses (ensoleillement, vents, éclairage naturel, bruits...) pour vérifier si toutes les décisions prises étaient justes. Bien qu'en général ce ne soit pas le cas - chaque projet ayant ses petits défauts - l'utilisation de cette plateforme a montré que le degré d'erreur était considérablement réduit. Quelques points restaient cependant à régler. Pour synthétiser notre travail, nous pouvons affirmer que l'intelligence artificielle ne pourra jamais remplacer le métier d'architecte au sens propre du terme. Certaines tâches, il est vrai, pourraient être réalisées par un client lui-même en utilisant l'IA pour obtenir plusieurs propositions et choisir les meilleures décisions (comme l'aménagement intérieur ou le traitement de façade). Cependant, en ce qui concerne le processus de conception architecturale dans son ensemble, l'IA ne peut actuellement pas fonctionner sans l'intervention de l'architecte et le véritable défi réside dans l'équilibre entre l'utilisation de ces technologies avancées et la préservation de l'essence créative du métier, faisant de l'architecte non pas un exécutant, mais un chef d'orchestre capable d'harmoniser calcul algorithmique et vision humaine pour concevoir des espaces à la fois performants et porteurs de sens.

Cependant, ils présentent aussi des limites, surtout en Algérie où le coût et l'accessibilité posent de vrais problèmes pour leur utilisation. Il y a aussi la complexité des outils, qui nécessite une formation poussée pour les exploiter pleinement. Enfin, il y a la question d'éthique et d'originalité, puisque c'est un algorithme : il ne fonctionne jamais comme un cerveau humain, mais travaille à partir d'une base de données.

D'autres logiciels d'intelligence artificielle, brièvement présentés précédemment tels que **Cove.tool** (optimisation énergétique des bâtiments), **Maket.ai** (génération automatisée de plans) ou **Adobe Photoshop Generative Fill** (retouche intelligente d'images), n'ont pas pu être exploités dans le projet d'atelier.

De futures recherches pourraient évaluer ces outils, explorer de nouvelles possibilités créatives, et de se familiariser avec des technologies de plus en plus utilisées dans le métier.

## VII. Référence bibliographique

- Autodesk Forma : prendre les bonnes décisions lors de la phase de planification n'a jamais été aussi facile.* (s.d.). Récupéré sur autodesk:  
<https://www.autodesk.com/fr/products/forma/overview>
- Baudouin, E. (2021). *L'architecture de Mésopotamie et du Caucase de la fin du 7e à la fin du 5e millénaire*. Brepols.
- BRILLAND, T., FANGEAT, E., MEYER, J., & WELLHOFF, M. (2025). Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France.
- Broadbent, G. (1969). *Design Methods in Architecture*. Lund Humphries.
- Chagny, N. (2025). *Pour une IA responsable et éthique (Numéro complet)*. Annales des Mines.
- Chaillou, S. (2020). *Intelligence Artificielle & Architecture*. Pavillon de l'Arsenal.
- Choudhary, L. (2024). Le Deep Learning rencontre le Machine Learning : une approche synergique vers l'intelligence artificielle. *Sciencedomain International*.
- CNIL. (2022, mars 25). *Intelligence artificielle, de quoi parle-t-on ?* Récupéré sur CNIL:  
<https://www.cnil.fr/fr/intelligence-artificielle/intelligence-artificielle-de-quoi-parle-t-on>
- Corbusier, L. (1983). *modulor 2*.
- David, b. (2024). *L'intelligence artificielle expliquée - Des concepts de base aux applications avancées de l'IA*. Editions ENI.
- européen, P. (2025). Intelligence artificielle : opportunités et risques. *Parlement européen*.
- FLAUSSE, S. (2011). *How to obtain a HQE certification and what do it contribute?*
- Georgia Tech Public Safety Facility*. (s.d.). Récupéré sur Cove.inc: <https://cove.inc/projects/georgia-tech-public-safety-facility>
- Henri, S. (1993). *L'architecture islamique*. Paris: Presses universitaires de France.
- HQE Bâtiment en Exploitation*. (2024). Récupéré sur Certivea: <https://certivea.fr/certifications/hqe-b-en-exploitation/>
- Indriyani, R., & Sobandi, B. (2024). Analyse de la théorie du développement cognitif de Jean Piaget sur les jeux de couleurs et le développement de la petite enfance. *Journal de l'innovation en éducation et en apprentissage Ahmar*.
- Jacques, F. (2009). *Architecture durable*.
- Jean, P. (1991). *Toward A Logic of Meanings*. New York.
- Jeanne, t. (2023, mai 08). *Comment ARCO a utilisé les informations basées sur les données de Forma pour transformer un site urbain difficile en un logement étudiant de valeur*. Récupéré sur autodesk: <https://blogs.autodesk.com/forma/2023/05/08/how-arco-used-formas-data-driven-insights-to-transform-a-challenging-urban-site-into-valuable-student-housing/>

- Jean-Yves, G., & Alan, T. (1999). *La machine de Turing*.
- Jones, J. C. (1970). "Design Methods: Seeds of Human Futures". John Wiley & Sons.
- Laureano, A., & Galo, D. R. (2020, Avril 27). *L'ère de l'IA dans la construction et les infrastructures*.  
Récupéré sur deloitte: <https://www.deloitte.com/ce/en/industries/industrial-construction/perspectives/the-age-of-with-ai-in-construction-and-infrastructure.html>
- Leach, N. (2022). *Architecture in the Age of Artificial Intelligence: An Introduction to AI for Architects*. Bloomsbury Visual Arts.
- Liébard, A., & de Herde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*.
- Marsault, X. (2024). IA pour l'architecture : enjeux et limites. *IA pour l'architecture : enjeux et limites*, (pp. 36-37). Lyon.
- Nagel, T. (1993). *le point de vue de nulle part*. Combas (France): Editions de l'éclat.
- Neema, P. (2010). *Le Développement Durable et l'architecture durable*.
- Nick, B. (2014). *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*. Malakoff.
- Olivier, H. (2003). *Vocabulaire de sciences cognitives : neuroscience, psychologie, intelligence artificielle, linguistique et philosophie*. Quadrige.
- Pierre, L., & Pierre, F. (2019). *Concevoir des bâtiments bioclimatiques*. Le moniteur.
- Robert, J. (2024, septembre 3). *DataScientest*. Récupéré sur DataScientest:  
<https://datascientest.com/intelligence-artificielle-definition>
- Scott, R. (2003). The Gothic Enterprise: A Guide to Understanding the Medieval Cathedral.
- STRUBELL, E., GANESH, A., & McCALLUM, A. (2020). Energy and Policy Considerations for Modern Deep Learning Research. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Récupéré sur <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/7123>
- Uysal, M., Karagul, Y., & Uysal, A. (2025). Un aperçu complet des grands modèles de langage (LLM). *IJFMR*.
- Victor, D. (1888). *Une dernière page d'histoire romaine*. Paris: Diderot et Cie.

## Sites web

- <https://www.archdaily.com/988710/how-can-ai-and-data-driven-tools-help-architects-design-compact-healthy-cities>
- <https://cove.inc/projects/georgia-tech-campus-center>
- <https://blogs.autodesk.com/forma/2023/05/08/how-arco-used-formas-data-driven-insights-to-transform-a-challenging-urban-site-into-valuable-student-housing/>
- <https://www.formes.ca/architecture/articles/l-ia-en-architecture-vers-de-nouveaux-horizons>
- <https://blog.dormakaba.com/fr/7-facons-dont-lintelligence-artificielle-revolutionne-larchitecture/>
- <https://www.hexabim.com/blog/l-ia-gagne-du-terrain-dans-le-btp-une-selection-de-7-outils-a-explorer>

<https://www.ad-magazin.de/artikel/kuenstliche-intelligenz-fabian-freytag-sergei-tchoban>

<https://www.arch2o.com/the-best-26-architecture-ai-tools-in-the-field/>

<https://www.world-architects.com/fr/architecture-news/insight/the-promise-of-generative-design>

<https://www.wealthcome.fr/wealthpro/limpact-de-lintelligence-artificielle-sur-la-gestion-de-patrimoine#:~:text=L'IA%20permet%20aux%20logiciels,cons%C3%A9quence%2C%20limitant%20ainsi%20les%20pertes.>