



Les instruments d'IA géoréférencés : outils et perspectives pour la conception urbaine et architecturale

Réalisé en lien avec le projet « Masques du génie du lieu »

Supervisé par Michael R. Doyle

Table des matières

Remerciements	3
Introduction	4
I. Contextualisation	5
Urbanisme numérique	5
La ville intelligente	6
II. Historique et principes clés de l'IA	7
Réseaux neuronaux, données massives & modèles préentraînés	8
III. Une vision commune	10
GeoAI & télédétection	10
IV. Adoption de l'IA dans les milieux professionnels	12
Biais algorithmiques.....	12
Un rôle décisionnel diminué ?.....	13
Un nouvel assistant ?.....	14
Effervescence	14
V. Questions et objectifs de recherche et méthodologie d'analyse d'articles	15
Question de recherche	15
Méthodologie	16
VI. Revue littéraire.....	17
Tableau synthèse 1	18
1.Identification des opportunités d'aménagement grâce à l'analyse algorithmique du territoire	19
2.Un atlas interactif du potentiel solaire et végétale des toitures urbaines	21
3.Mesure par avis géoréférencés de la qualité des espaces urbains	23
4.La lecture géoréférencée des émotions humaines comme outil d'analyse.....	25
5.Lecture par segmentation d'images de la qualité visuelle des rues.....	29
6.Un indice de « marchabilité » enrichi par l'analyse micro-environnementale automatisée	33
VII. Synthèse.....	35

Tableau synthèse 2	36
Discussion	38
Conclusion.....	42
Bibliographie	43
Médiagraphie.....	46

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cet essai. Que ce soit par votre support ou votre apport en informations, vous m'avez été d'une aide précieuse, et ce tout au long de cette activité terminale. Je tiens également à remercier mon superviseur Michael R. Doyle pour sa présence dans la dernière année. De par sa vision, ses idées et ses nombreuses pistes de réflexion, il m'a permis d'aborder ce projet de recherche avec toute l'attention qu'il requiert.

Introduction

Avec l'intégration de l'intelligence artificielle dans le quotidien, les méthodes de travail et manières d'appréhender la conception urbaine ainsi qu'architecturale sont vouées à se transformer dans les prochaines années (Tellios et al., 2023, p. 22-23). Au même titre que l'apparition des outils de dessin assisté à l'ordinateur à la fin du 20^e siècle, l'intelligence artificielle offre de nouvelles opportunités aux concepteurs.

Dans un contexte où le Québec révisé actuellement ses Orientations gouvernementales en aménagement du territoire (OGAT), cet essai s'intéresse aux outils d'IA actuellement discutées dans la recherche qui utilise des données territoriales et urbaines géoréférencées qui pourraient devenir des outils d'aide à la décision dans de tels processus. Cet essai vise à exposer une série de projets de développement et de plateformes qui ont vu le jour grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle et de ces types de donnée. La recherche se veut exploratoire et elle a été réalisée dans un cadre académique limité. Il est important de souligner que six instruments sont présentés. Ils ont été choisis par leur complémentarité entre eux et par le dialogue qu'ils pourraient entreprendre avec l'outil développé dans le cadre du projet de recherches Masques et génie du lieu. Une mise à nu de ces logiciels est proposée afin d'exposer leur fonctionnement et leur structure, offrant ainsi au lecteur peu familier avec le monde de l'intelligence artificielle l'occasion de découvrir son développement et ses principes de base qui permettent de traiter et d'analyser d'impressionnantes quantités de données. Ainsi, l'essai s'organise selon ces sept sections.

La première section de l'essai nommée *Contextualisation* vise à informer le lecteur sur le contexte urbanistique actuel ayant influencé la vision et le développement de l'essai. La seconde, émanant de cette vision, dresse un portrait historique, avec les étapes et évolutions clés qui ont façonné le développement de l'intelligence artificielle. À la suite de ce recensement historique, en troisième lieu, une vision théorique commune à l'ensemble des outils se voit exposée. La quatrième section, de son côté, s'intéresse aux perspectives quant à l'adoption d'outils d'intelligence artificielle dans les milieux professionnels. À la suite à cette analyse, la problématique et la question de recherche sont présentées. Ceux-ci servent de point d'ancrage à la sixième section qui est constituée de l'analyse des six articles. Finalement, comme dernière et septième section de cet essai, une synthèse est présentée de manière à exposer les observations réalisées tout au long du processus de rédaction ainsi que les conclusions à en retirer.

I. Contextualisation

Affirmer que les villes sont en constante évolution peut sembler une évidence. Pourtant, en 2025, cette réalité prend tout son sens. Encouragée par l'essor des nouvelles technologies, la ville se métamorphose, redéfinissant le quotidien urbain et la manière dont elle se révèle à ses habitants. Planification, gestion et développement sont désormais indissociables des outils numériques qui se présentent comme indispensable à la planification de la ville de demain. Depuis 75 ans, l'urbanisation connaît une accélération sans précédent. En effet, selon l'ONU, en 1950, seulement 30 % de la population mondiale résidait en milieu urbain ou périurbain. En 2018, ce chiffre atteignait 55%. Selon leurs projections, il devrait grimper à 66 % d'ici 2050 (ONU, 2022). Cette croissance rapide a engendré une densification accrue des territoires, favorisant la formation de pôles urbains autour de ressources stratégiques et de zones d'intérêt. Ce phénomène s'est accompagné d'un processus culturel majeur : l'urbanisation. Ce dernier a redéfini les modes de vie et les structures sociales (ONU, 2022). Toutes les villes, qu'elles soient historiques ou contemporaines, ont dû s'adapter à ces transformations. Leur configuration actuelle est le fruit de décisions politiques, sociales et économiques successives. Aujourd'hui, la ville ne se limite plus à une simple évolution organique et morphologique.

Urbanisme numérique

Dans les dernières années, face aux défis croissants de la gestion des ressources urbaines, les décideurs publics ont progressivement adopté de nouveaux outils technologiques de manière à optimiser la gestion de leur planification et du contrôle de leur environnement (Reinhard & Schneider, 2020, p. 532). Ainsi, la ville se transforme en devenant une entité connectée intégrant des systèmes intelligents pour répondre aux défis du XXI^e siècle (Reinhard & Schneider, 2020, p. 531-534). À titre d'exemple, celles-ci ont vu s'implanter des capteurs mesurant la pollution de l'air, les flux de trafic, ainsi que des modélisations 3D permettant une gestion et une planification de leurs infrastructures (Reinhard & Schneider, 2020, p. 536). Toutefois, en fonction des besoins spécifiques et des contextes locaux, leur niveau d'implantation et d'imbrication aux processus décisionnels peut varier. Avec ces outils, la ville offre à ses décideurs et planificateurs un portrait factuel des différentes réalités et contraintes afin de nourrir leur processus conceptuel (Reinhard & Schneider, 2020, p. 536). Ce faisant, ces outils ne génèrent pas directement de dialogue entre eux. Leur utilisation demeure dépendante de l'intervention humaine.

La ville intelligente

Le concept de ville intelligente s'inscrit dans un courant idéologique et technologique visant à transformer les villes en espaces intelligents performants grâce à l'intégration des technologies numériques. Cette vision mise sur l'intégration de l'intelligence artificielle aux processus de gestion et de développement. Elle s'appuie principalement sur l'Internet des objets (IoT) et les données massives (Reinhard & Schneider, 2020, p. 534). Concrètement, celles-ci permettent d'analyser en temps réel des flux complexes de données issues d'infrastructures connectées, des bases géoréférencées et des interactions des citoyens avec leur environnement. Plus précisément, ces bases de données offrent la possibilité d'avoir une lecture des interactions sociales, spatiales, culturelles et numériques des citoyens avec leur cadre de vie, en révélant leurs usages de l'espace, leurs déplacements, leurs préférences, ainsi que leur participation active ou passive aux dynamiques urbaines (Reinhard & Schneider, 2020, p. 534). L'Internet des objets (IoT), de son côté, désigne le réseau d'objets physiques générant ces données. Grâce à l'intelligence artificielle, les données de la ville se voient automatiquement traitées, classées et interprétées, facilitant ainsi la prise de décision et l'optimisation des services urbains. Ainsi, de manière à assurer une compréhension juste et claire des principes pouvant mener à une utilisation de l'intelligence artificielle dans les villes ou en aménagement du territoire, un historique, certaines composantes et une vision commune derrière les outils étudiés dans cet essai seront présentés brièvement.

II. Historique et principes clés de l'IA

Pour comprendre et illustrer les principes de base de l'intelligence artificielle, il convient d'exposer l'histoire de son développement. Selon le contexte de rédaction de cet essai, qui s'appuie sur la prémisse suivante : « *Les données massives sont des données non structurées, peu maniables et possiblement incomplètes. La seule façon de les traiter est l'IA probabiliste. En d'autres mots, plutôt que d'analyser les données et de tirer des conclusions statistiques pour prouver ou infirmer votre point de vue, vous permettez à l'algorithme de trouver tous les modèles dans leurs probabilités*¹. » T.L.; une attention particulière sera portée aux concepts des données massives et des algorithmes d'apprentissage machine (Hovestadt, 2020, p. 561). L'intelligence artificielle (IA) fascine, et ce, depuis plusieurs années l'être humain. L'idée de concevoir une forme d'intelligence non humaine, mais créée par l'homme remonte à des écrits datant plusieurs siècles (Hovestadt, 2020, p. 551). D'ailleurs, les véritables bases scientifiques de l'intelligence artificielle furent posées au XIX siècle. George Boole (1815-1864), dans son ouvrage *An investigation of the Laws of Thought* il a introduit, pour la première fois, une structure binaire reposant sur trois opérateurs fondamentaux permettant de modéliser le raisonnement humain :

And : permet de vérifier si deux conditions sont vraies simultanément

Or : vérifie si au moins une des conditions est vraie.

Not : permet d'exclure certaines conditions

Encore aujourd'hui, ces opérateurs logiques constituent la base des circuits électroniques et des algorithmes de L'IA. Comme la pensée humaine, ils permettent aux systèmes programmés d'évaluer un large éventail de possibilités. Pourtant, ce n'est qu'en 1956, dans le cadre du « Darmouth Summer Research Project » que le terme intelligence artificielle fut réellement formalisé. C'est à partir de ce moment, et encouragé par la définition de John McCarthy que les recherches sur les algorithmes capables de reproduire le raisonnement humain ont débuté (Hovestadt, 2020, p. 554). L'une des premières étapes significatives vers le développement des capacités d'apprentissage machine fut franchie par Arthur Samuel en 1959. En effet, ce dernier a introduit l'idée que les ordinateurs pouvaient apprendre à exécuter une tâche sans être explicitement programmés pour celle-ci (Hovestadt, 2020, p. 560). Il a notamment développé un programme de jeu de dames où l'ordinateur était capable d'apprendre de ses erreurs grâce à l'apprentissage par renforcement. C'est une forme d'autoamélioration qui optimise les performances et les stratégies d'un modèle à travers des essais répétés. Il s'agit de l'une des premières applications concrètes de l'apprentissage machine qu'il a défini ainsi : « *L'apprentissage automatique est le domaine d'étude qui donne aux ordinateurs la capacité d'apprendre sans être explicitement programmés* » T.L (Hovestadt, 2020, p. 560)

¹ « *Big data is data that is unstructured, unwieldy and possibly incomplete. The only way to deal with it is with probabilistic AI. In other words : rather than sitting down to analyse the data and draw statistical conclusions to prove or disprove your point you allow the algorithm to find all patterns in their probabilities* »

Réseaux neuronaux, données massives & modèles préentraînés

Parallèlement à ces avancées, les premiers modèles de réseaux neuronaux ont vu le jour. En 1958, Frank Rosenblatt a présenté le Perceptron, un algorithme capable de classer des données en fonction de leur appartenance à différentes catégories. Son objectif était de démontrer que les machines pouvaient apprendre à reconnaître des modèles sans intervention humaine directe (Rosenblatt, 1958, p. 387). Toutefois, le Perceptron simple était limité : il ne pouvait résoudre que des problèmes linéairement séparables selon le principe de séparabilité statistique. Un problème est dit linéairement séparable lorsque les données peuvent être séparées par une simple frontière linéaire, tels une droite ou un plan (Rosenblatt, 1958). Cette première tentative a néanmoins jeté des bases pour des développements futurs en intelligence artificielle. Dans une poursuite de la vision du Perceptron, l'introduction de l'algorithme de rétropropagation dans les années 1980 par David Rumelhart, Geoffrey Hinton et Ronald Williams, a permis l'émergence de réseaux de neurones multicouches (Rumelhart et al., 1986, p. 533). Cet algorithme a notamment permis d'ajuster les poids de connexions entre les neurones afin de minimiser les erreurs et permettre l'entraînement de réseaux multicouches rendant ce type d'algorithmes plus efficaces et précis (Rumelhart et al., 1986, p. 534). C'est grâce à ce procédé que le processus d'apprentissage profond tel que connu aujourd'hui a connu des avancées majeures. Comme les opérateurs logiques de George Boole, ces réseaux neuronaux sont encore aujourd'hui présents dans les bases de l'intelligence artificielle moderne.

C'est par la mise en relation de l'ensemble de ces avancées algorithmiques que l'IA moderne, tel que connu à ce jour, a pu être développée. Bien que cette dernière soit beaucoup plus puissante que les mécanismes d'origines qui ont soutenu son développement, il demeure que ceux-ci la nourrissent et constituent, avec d'autres, la base de son fonctionnement. L'algorithme de rétropropagation, les réseaux neuronaux et les principes d'apprentissages machine ont joué un rôle clé dans l'essor de l'intelligence artificielle moderne (Hovestadt, 2020; Rosenblatt, 1958; Rumelhart et al., 1986). Toutefois, c'est l'essor du traitement des données massives qui a considérablement renforcé son efficacité tout en multipliant ses champs d'applications. En effet, selon Souâd Demigha, les données massives sont des données qui, en raison de leur volume, de leur complexité et de la vitesse à laquelle elles sont générées, ne peuvent être traitées efficacement par des méthodes traditionnelles (2020, p. 1395). Par les termes méthodes traditionnelles, l'auteure fait référence, notamment, à des systèmes conçus pour traiter des données structurées qui ne sont pas adaptés aux exigences du traitement en temps réel. C'est ainsi que les mécanismes mentionnés plus haut (réseaux neuronaux et algorithmes de rétropropagations) entrent en scène en permettant le traitement de ces données tout en apprenant de ces dernières. Les données massives constituent une ressource essentielle pour l'intelligence artificielle en alimentant son apprentissage et en optimisant son efficacité. Pour être performante, l'IA requiert d'importants volumes de données. Avec "plus", une plus grande partie du possible devient probable.

Grâce à l'essor d'Internet et à la multiplication des capteurs connectés, l'accès à des bases de données massives s'est considérablement accru (Hovestadt, 2020, p. 553). Cela permet à l'intelligence artificielle d'intervenir dans des domaines variés tels que la planification, le traitement du langage naturel et la résolution de problèmes (Hovestadt, 2020, p. 551). Globalement, les données massives, étant hétérogènes, permettent à l'intelligence artificielle de détecter des informations qu'un être humain ne pourrait identifier seul, ou qui exigeraient une charge cognitive trop importante. Grâce à ce type de données, l'IA peut prendre des décisions en temps réel et optimiser l'efficacité de ses utilisateurs (Demigha, 2020, p. 1397). Ainsi, il est juste d'affirmer que l'intelligence artificielle et les données massives sont complémentaires et indissociables. « *L'IA s'améliore au fur et à mesure qu'elle reçoit des données [...] D'un autre côté, les données massives sont tout simplement inutile sans logiciel pour les analyser* » T.I. (Demigha, 2020, p. 1397)

Dans le cadre de cet essai, la recherche s'intéressera à des logiciels d'intelligence artificielle se nourrissant de jeux de données massives géoréférencées qui dans certains cas utilisent des modèles pré-entraînés pour les analyser. En effet, certains modèles tels que Deeplabv3+ ou ResNet qui figurent dans les méthodes d'analyse des outils présentés permettent d'extraire automatiquement des caractéristiques spatiales à partir d'images ou de données matricielles. Ces réseaux neuronaux, préalablement entraînés grâce à l'apprentissage profond, sont capables de structurer ces données en couches successives, associant par exemple une caractéristique à des groupes de pixels donnés. Ils peuvent par exemple organiser les pixels d'une image satellite afin de classifier certains usages, associer des formes à des degrés d'occupation de sol et identifier des zones construites.

Dans une ère où la ville devient intelligente, ces sources de données ont le potentiel d'offrir une vision ancrée dans le territoire tout en offrant de nouveaux outils aux professionnels de l'architecture, de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire. Grâce à ceux-ci, les professionnels ont l'opportunité d'intégrer des outils d'intelligence artificielle à leur processus conceptuel.

III. Une vision commune

GeoAI & télédétection

Avant d'entreprendre la présentation exhaustive d'une série d'outils et de projets de recherches, il convient d'exposer une tendance théorique dans laquelle ces derniers semblent s'inscrire. L'intégration de l'intelligence artificielle en aménagement du territoire est relativement récente. Toutefois, avec l'accélération des recherches et du développement, sa présence tend à augmenter de manière significative dans le quotidien des professionnels et des chercheurs (Li & Hsu, 2022, p. 1-2). L'émergence de ces nouveaux outils a mené à la formation d'une vision globale pour l'ensemble de ces nouveaux instruments. Le *GeoAI* est utilisé pour faire référence à l'intégration de l'intelligence artificielle et des technologies géospatiales comme outil d'analyse en urbanisme, en environnement, en gestion de la mobilité et des ressources naturelles. C'est un champ interdisciplinaire combinant, l'IA, la géomatique, la cartographie et les systèmes d'information (SIG) qui permettent de modéliser et de comprendre les dynamiques territoriales (Li & Hsu, 2022, p. 2-3).

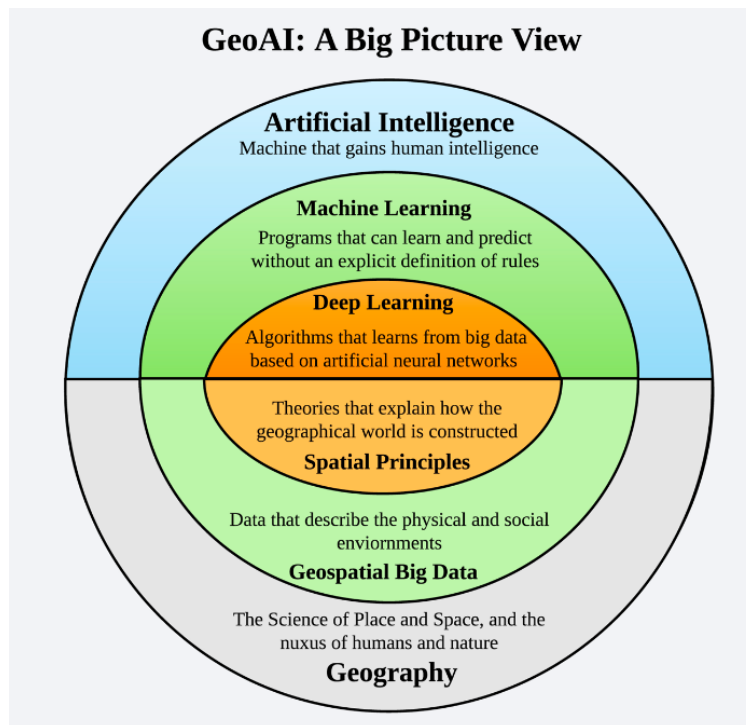


Figure 1 : Li & Hsu, 2022, A big picture view of GeoAI, p. 3

Le terme, dans sa globalité, a été popularisé en 2017 lors de la conférence *Acm Sigspatial* en 2017 et fut adopté par des joueurs importants de l'industrie des technologies telles que *Microsoft* et *Esri* (Li & Hsu, 2022, p. 2). Par l'intégration de nouveaux outils dans le quotidien des professionnels de l'aménagement, le *GeoAI* offre et met de l'avant une rupture méthodologique à ces derniers. Cet ensemble de logiciels mobilise et intègre une série de méthodes qui dialoguent avec les instruments recensés dans le cadre de cet essai. En effet, le *GeoAI* repose sur l'intégration d'architectures d'apprentissage profond, telles que les réseaux neuronaux convolutionnels, afin

d'automatiser l'analyse de vastes ensembles de données géospatiales. Dans la littérature consultée, les réseaux neuronaux sont cités comme des outils surpassant les méthodes d'analyses traditionnelles utilisées pour la lecture d'images satellites et de données de capteurs urbains (Li & Hsu, 2022, p. 2). Par exemple, grâce aux réseaux de neurones convolutionnels « CNN », il est possible d'utiliser et d'analyser de l'imagerie satellite pour faire ressortir les changements dans l'occupation du sol qui sont des caractéristiques pertinentes pour assurer le suivi de l'urbanisation d'une région, la gestion des risques naturels et anticiper des catastrophes (Li & Hsu, 2022, p. 13 & 14). Les réseaux neuronaux de type « RNN » (Réseaux de Neurones Récurents) permettent, quant à eux, la prédiction de tendances spatiotemporelles grâce à leur architecture informatique qui leur offre l'opportunité d'analyser des données séquentielles intégrant une mémoire interne (Li & Hsu, 2022, p. 9). Ces modèles sont notamment utilisés pour estimer l'évolution de la densité urbaine ou pour modéliser les dynamiques de mobilité, comme le montrent certaines études intégrant des capteurs urbains et des données de réseaux de transport en temps réel (Biljecki, 2023, p. 3-4). Enfin, le *GeoAI* repose aussi sur l'intégration de modèles attentifs, qui permettent la reconnaissance d'objets urbains à partir de *Google Street View* ou tout autre logiciel d'immersion urbaine. Une application notable dans ce domaine est son utilisation pour prédire les paysages sonores urbains en analysant la morphologie des rues ce qui permet d'évaluer l'impact des infrastructures sur l'environnement sonore des quartiers (Biljecki, 2023, p. 3-4).

Bien que le *GeoAI* cherche à intégrer l'intelligence artificielle à l'analyse territoriale, son efficacité demeure tributaire de la qualité et de la diversité des données mobilisées (Biljecki, 2023, p. 1). C'est dans ce contexte que la télédétection urbaine joue un rôle essentiel en fournissant des informations en temps réel issu de sources multiples permettant une compréhension fine des environnements urbains (Biljecki, 2023, p. 7). Ce concept englobe un ensemble de méthodes de collectes de données permettant de capter et d'interpréter les dynamiques territoriales à partir de capteurs urbains, d'images satellites, de données collaboratives (ex. OpenStreetMap), d'informations issues des réseaux sociaux et de données cellulaires. Grâce à l'essor des technologies de télédétection et des systèmes d'imagerie urbaine (ex. Google Street View, drones, capteurs mobiles), la télédétection urbaine permet d'observer et d'analyser en continu l'évolution des villes, notamment en matière d'infrastructures, de flux de mobilité et de perception de l'environnement bâti (Biljecki, 2023, p. 1-3). En complément du *GeoAI*, qui mobilise des modèles d'apprentissage automatique pour extraire et modéliser l'information géospatiale, la télédétection urbaine se distingue par sa capacité à intégrer des données issues d'observations in situ et de capteurs dynamiques.

Dans le cadre de cet essai, le potentiel de cette lecture des dynamiques urbaines sera approfondi à travers la présentation d'outils d'intelligence artificielle exploitant les sources de données mentionnées plus haut. L'essor du *GeoAI* et de la télédétection urbaine a permis le développement de solutions analytiques innovantes qui transforment la façon d'étudier, de comprendre et de modéliser le territoire.

IV. Adoption de l'IA dans les milieux professionnels

Biais algorithmiques

Bien que l'intelligence artificielle ait déjà prouvé son efficacité dans une série de domaines, son implantation dans les milieux professionnels reste encore sujette à débat et les perceptions concernant l'adoption de cette technologie varient considérablement (Presbitero & Teng-Calleja, 2023, p. 1169-1170). En effet, dans la littérature consultée, plusieurs points de vue sont avancés. Certains voient d'un bon œil l'avènement de ces nouveaux outils, notamment par le gain d'efficacité qu'ils peuvent apporter, mais plusieurs sont réticents à laisser leur travail se faire influencer par des procédés algorithmiques. Un des principaux arguments soulevés est que la cybernétisation des villes pourrait mener à une planification trop rigide face aux réalités du terrain et introduire des biais algorithmiques dans une future planification urbaine (Palmini & Cugurullo, 2023, p. 9). Considérant que l'intelligence artificielle se nourrit de données existantes, ces modèles algorithmiques pourraient perpétuer ou reproduire des inégalités sociales et foncières dans les processus décisionnels. « *Le risque est de perpétuer la discrimination et l'inégalité, qui est un problème urbain déjà présent, identifié dans le marché du logement et la police prédictive* » T.l.(Palmini & Cugurullo, 2023, p. 5). À ce propos, la police prédictive désigne l'utilisation conjointe de données géospatiales (GIS), de logiciels spécialisés et de méthodes statistiques pour cartographier les dynamiques criminelles, afin d'identifier des cibles potentielles d'intervention policière. Cette approche repose sur une logique anticipatoire, caractéristique du mouvement des villes intelligentes (Tulumello & Iapaolo, 2022, p. 452). En somme, ce que Otello Palmini et Federico Cugurullo défendent, c'est que ce qui est historiquement probable n'est pas directement souhaitable. À titre d'exemple, ils soulignent que l'utilisation de jeux de données historiques biaisés pourrait entraîner la reproduction automatique de discriminations et d'omissions dans l'analyse de l'offre résidentielle d'un territoire. Dans certains cas, des algorithmes conçus pour évaluer la solvabilité ou les préférences résidentielles des habitants d'un secteur ont conduit à l'exclusion de certains groupes sociaux. De plus, si certains quartiers ont été historiquement sous-financés ou défavorisés dans l'octroi de prêts, l'algorithme risque d'aggraver ces inégalités en tenant pour naturelles et nécessaires les corrélations spatiales des réalités socio-économiques. (Palmini & Cugurullo, 2023, p. 6).

Un rôle décisionnel diminué ?

En lien avec ces biais, plusieurs professionnels soulèvent la crainte de voir leur rôle décisionnel diminué par ces outils, notamment dû au fait que l'intelligence artificielle imite les procédés cognitifs humains tout en les automatisant. Bien qu'entre contreparties, plusieurs urbanistes soulèvent le possible gain d'efficacité que l'IA peut leur apporter et la voie comme un instrument permettant une extension de leurs capacités, des doutes sont soulevés quant à la nature de certains algorithmes (Sanchez et al., 2023, p. 2-3). De nombreux chercheurs et professionnels ont du mal à comprendre comment les outils d'intelligence artificielle prennent leurs décisions. Ils se voient confrontés à des modèles d'IA qui fonctionnent sans explication claire de leurs résultats, notamment lorsqu'il s'agit de classifier des usages du sol, d'analyser des flux de transport ou encore de simuler des scénarios de développement urbain. (Sanchez et al., 2023, p. 3). À ce sujet, Thomas W. Sanchez, professeur en urbanisme dont les recherches portent sur l'intégration d'outils d'aide à la décision et d'IA en urbanisme, plaide pour l'adoption et la démocratisation de l'intelligence artificielle explicable « Explainable AI – XAI ». Il se base notamment sur les écrits de Amina Adadi et Mohammed Berrada qui plaident pour une mise à nue des algorithmes et des données qu'ils utilisent afin de rendre les décisions algorithmiques plus transparentes et interprétables pour l'utilisateur. Contrairement aux modèles opaques, les plateformes basées sur l'XAI expliquent quelles variables influencent la prise de décisions de leur l'algorithme (Adadi & Berrada, 2018, p. 52139-52140). À titre d'exemple, les auteurs soulignent que ce type d'IA pourrait aider à mieux comprendre certains choix algorithmiques pris par des véhicules autonomes et qui ont mené à des accidents. En Arizona, une femme a été happée mortellement par un véhicule autonome ayant mal interprété les contraintes de son environnement. Malheureusement, les algorithmes de ces véhicules sont opaques et difficilement accessibles. Les auteurs soutiennent qu'un système de type XAI aurait permis de mieux comprendre cette anomalie et dans le futur, mieux l'éviter (Adadi & Berrada, 2018, p. 52143). Bien que cet exemple ne soit pas spécifiquement en lien avec les sciences de l'aménagement, il témoigne du brouillard qui est présent actuellement face à ces algorithmes opaques. Enfin, se basant sur le principe de ces nouvelles IA Thomas W. Sanchez plaide pour que l'ensemble des professionnels en aménagement aient accès à des instruments leur permettant de comprendre les résultats de leurs analyses, grâce à des explications claires sur leur fonctionnement et sur les données alimentant leurs algorithmes (2023) .

Un nouvel assistant ?

Face à ces nouveaux outils, des professionnels de l'aménagement craignent que l'intelligence artificielle ne soit pas en mesure de comprendre et gérer les dimensions subjectives des projets de design urbain et d'architecture (Quan et al., 2019, p. 3). De la même manière, l'IA ne présenterait pas selon les auteurs la capacité d'évaluer la beauté ou l'harmonie d'un projet selon les sensibilités locales (Quan et al., 2019, p. 3). Afin d'imager leur propos, un quartier remodelé par l'IA, bien que conforme aux standards d'efficacité qui lui aurait été dictée, pourrait être perçu comme stérile et inhospitalier s'il ne prend pas en compte les éléments subjectifs du design qui influencent le bien-être et l'identité de ses résidents. Malgré ces points négatifs soulevés, des nuances subsistent. En effet, de nombreux points de vue s'entendent pour dire que l'intelligence artificielle se présente comme une collaboratrice potentielle dans les premières phases d'un projet (Joyce, 2021, p. 131). Elle offre notamment une capacité de synthèse et d'analyse qui peut nourrir des prises de décisions, la définition de critères de design et de grandes perspectives d'aménagement en fonction de diverses contraintes. Certains architectes voient même l'IA comme un instrument permettant l'accélération des processus de conception grâce à ses capacités génératives (Joyce, 2021, p. 150). À l'échelle urbaine, l'IA est citée comme un outil qui pourrait permettre la conception d'espaces urbains plus performants grâce aux données qu'elle pourrait amener dans les processus d'analyse (Quan et al., 2019, p. 4). Globalement, les six études consultées font preuve d'une certaine prudence, reflétant à la fois une crainte de voir l'humain supplanté par la machine et une réserve face à l'effervescence technologique qui caractérise le monde de l'IA. Toutefois, un consensus semble émerger quant aux possibilités offertes par un mariage des savoirs humains à ceux offerts par l'intelligence artificielle.

Effervescence

L'effervescence dont il est question plus haut n'est pas sans impact. L'abondance d'outils et de méthodes disponibles complexifie l'adoption de l'intelligence artificielle par les professionnels de l'aménagement et de l'architecture. Ceux-ci sont confrontés à une offre fragmentée et en constante évolution, marquée par une diversité de formes d'IA dites faibles, générales ou superintelligentes ainsi que par des degrés d'autonomie variés, allant des systèmes réactifs à des intelligences délibératives, cognitives, voire entièrement autonomes (Morandín-Ahuerma, 2022, p. 1948). Or, l'urbanisme est une discipline qui accuse un certain retard dans l'intégration des nouvelles technologies, malgré l'essor du concept de « smart cities » (Sanchez et al., 2023, p. 2-3). Ce décalage s'explique en partie par des approches ancrées dans des méthodes traditionnelles qui semblent être privilégiées par des agences de planification urbaine et certains organismes municipaux. Ainsi, l'IA semble s'imposer comme un défi supplémentaire dans un milieu où l'adoption du numérique reste encore à bonifier. Quel est son potentiel, considérant les données à disposition et les algorithmes accessibles gratuitement ?

V. Questions et objectifs de recherche et méthodologie d'analyse d'articles

Dans une ère technologique où les professionnels de l'architecture et de l'aménagement se voient confrontés à une prolifération rapide d'outils d'intelligence artificielle (IA), leur adoption demeure un défi majeur. Alors que ces logiciels commencent tout juste à révéler leur plein potentiel, le milieu de l'aménagement assiste à une multiplication des plateformes et des applications proposant de nouvelles opportunités aux architectes, urbanistes et autres professionnels de l'aménagement. Cette multiplication, rapide, confronte le futur utilisateur à un décuplement des possibilités. Ce dernier, selon Alexander Chernev et ses collaborateurs, pourrait mener à une surcharge de choix et nuire à l'implantation de ces instruments, notamment par le rejet qu'il pourrait causer (Chernev et al., 2015, p. 334-339). Serait-il possible, à titre d'exemple, que certains professionnels de l'aménagement rejettent d'emblée ces logiciels non seulement en raison du manque de consensus quant aux outils à privilégier, mais aussi en raison d'une incertitude quant aux bénéfices concrets de leur adoption ? Cette phase actuelle, dans le développement des instruments d'IA où les innovations se succèdent à un rythme effréné, peut générer une forme de pression technologique (Roman, 2019, p. 10). De plus, Chernev et al. soulignent que plus le choix est complexe, plus la difficulté décisionnelle s'accroît, menant souvent à une réticence ou à un report de décision (2015, p. 335). Le professionnel se retrouve donc dans un environnement technologique difficile à structurer où chaque nouvel outil / technologie ouvre de nouvelles opportunités. Face à cette complexité et à l'absence de repères unifiés, nombreux sont ceux qui choisissent d'éviter cette situation en favorisant le maintien de méthodes traditionnelles, privilégiant ainsi la stabilité et la présence d'outils éprouvés. Dans son livre « Play Among books », l'auteur Miro Roman, faisant référence à cette problématique, abonde en ce sens : « *Ils sont surtout effrayés par l'abondance, la quantité de données et les perturbations qu'elles apportent au discours, à la discipline et aux hiérarchies établis, de sorte qu'ils ont tendance à les ignorer et à s'en tenir aux connaissances établies* » T.I. (2019, p. 398). Face à cette hypothèse, il convient d'exposer une série de projets de recherches innovants illustrant le potentiel de ces outils pour possiblement, aider les gens réfractaires à apprivoiser ces nouveaux logiciels. C'est dans ce contexte que s'expose la question de recherche suivante :

Question de recherche

Quels sont les outils d'intelligence artificielle actuellement discutés dans la recherche scientifique ou utilisée sur le marché ? À quel point peuvent-ils être utiles dans un projet de design urbain ?

Méthodologie

Selon cette question, cette recherche s'appuie sur une recension d'écrits scientifiques qui a été réalisée de novembre 2024 à mars 2025. Grâce à cette dernière, six articles présentant divers outils d'intelligence artificielle utilisés en architecture et en urbanisme ont été relevés. Ces derniers possèdent des caractéristiques similaires, facilitant leur comparabilité. Ainsi, les plateformes et outils présentés dans cet essai mobilisent des bases de données algorithmiques géolocalisées construites à partir de données ouvertes. Plus spécifiquement, l'analyse s'attarde à la façon dont ces données sont traitées, organisées et mises en forme pour les utilisateurs, en précisant les types avec lesquelles elles sont croisées ainsi que les algorithmes mobilisés pour leur exploitation. Dans le cadre de cet essai, l'intelligence artificielle a été utilisée comme un outil aidant à la compréhension des textes consultés, mais aussi comme moteur de recherche. En effet, l'agent conversationnel ChatGPT et l'outil de recherche documentaire Elicit ont permis d'accéder plus facilement à des textes pertinents, notamment grâce aux instructions génératives qui peuvent leur être soumises. Par exemple, pour la plateforme Elicit des sujets clés lui ont été proposés : « *Architecture and urban planning professionals' views on integrating artificial intelligence into their work* ». L'idée, avec ces courtes phrases, était de guider le moteur de recherche intelligent vers des sujets précis qui étaient pertinents pour l'essai. L'utilisation de ChatGPT a permis d'identifier rapidement les thèmes et les termes récurrents liés au sujet de recherche. Grâce à des instructions génératives telles que : « *What decision-support tools are currently being discussed in scientific research or used on the market, and what geolocalized data feed them? How can these tools become architectural design tools ?* », le logiciel interactif a pu orienter la recherche vers des sources spécifiques telles que les données de télédétection urbaine, GIS ou bien l'imagerie satellite. Afin de comprendre la signification de concepts clés, du fonctionnement d'algorithmes et du traitement des données massives, ChatGPT a été utilisé pour lire certains articles. L'objectif avec cette méthode était d'avoir une conversation avec le logiciel en lui indiquant spécifiquement qu'il devait baser ses réponses sur les informations du PDF. Cette façon de travailler a été d'une grande aide dans la compréhension de concepts informatiques loin de ceux du design urbain. Par exemple, ce type d'instruction lui a été soumis : « *Je vais te fournir un article PDF. J'ai des questions concernant un sujet en particulier. Réponds-moi avec le contenu de l'article PDF. Indique-moi le numéro de page où se trouve l'information et l'extrait original ayant mené à ta réponse. N'invente rien. Voici la question : qu'est-ce qu'un problème linéairement séparable ?* ». Cette recherche aura donc été l'occasion d'explorer de nouvelles façons d'accéder à de l'information à l'aide d'assistants intelligents, lesquels, à l'image des outils présentés dans cet essai, nécessitent encore discernement et jugement humain.

VI. Revue littéraire

Cette section comprend la présentation d'un tableau synthèse des six articles relevés dans le cadre de cet essai.

Tableau synthèse 1

Identification				
# article	Titre de l'article	Année publication	Chercheurs principaux	Institution
1	<i>AI as a collaborator in the early stage of the design.</i>	2021	Sam Conrad Joyce	• Université de technologie et de design de Singapour • Institut technologique du Massachusetts (États-Unis)
2	<i>Roofpedia : Automatic mapping of green and solar roofs for an open roofscape registry and evaluation of urban sustainability. Landscape and Urban Planning</i>	2021	• Filip Biljecki • Abraham Noah Wu	• Université nationale de Singapour (Singapour)
3	<i>Context Décoder—Measuring urban quality through artificial intelligence.</i>	2022	• Laura Marsillo • Nawapan Suntorachai • Keshava Narayan Karthikeyan • Et al.	• Institut pour l’architecture avancée de Catalogne (Espagne)
4	<i>Extracting human emotions at different places based on facial expressions and spatial clustering analysis</i>	2019	• Yuhao Kang • Qingyuan Jia • Et al.	• Université du Wisconsin (États-Unis) • Université de Wuhan (Chine)
5	The visual quality of streets : A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images.	2019	• Yu Ye • Wei Zeng • Qiaomu Shen	• Université Tongji (Chine) • Institut des technologies avancées de Shenzhen (Chine)
6	<i>A novel walkability index using google street view and deep learning. Sustainable Cities and Society</i>	2023	• Donghwan KI • Zhenhua Chen • Sugie Le	• Université de l’Ohio (États-Unis) • Université Hanyang (Corée du Sud)

1. Identification des opportunités d'aménagement grâce à l'analyse algorithmique du territoire

Joyce, S. C. (2021). *AI as a collaborator in the early stage of the design*. Dans I. As & P. Basu (Éds.), *The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture* (1^{re} éd., p. 130-159). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780367824259-9>

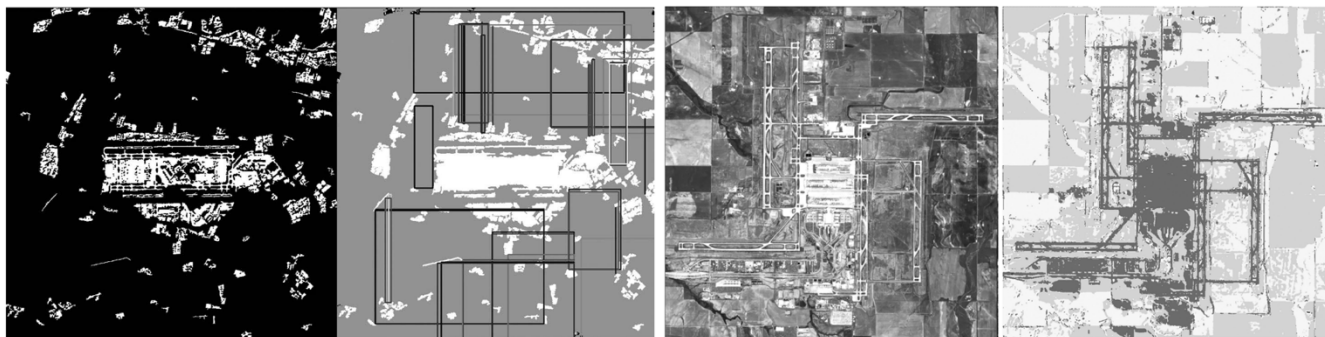


Figure 2 : Joyce. 2021, U-Net & Flood-Fill analysis, p. 139-140

L'utilisation d'algorithmes d'apprentissages machine en aménagement du territoire offre une série de possibilités. Une qui se démarque par son degré de pertinence pour la pratique s'inscrit dans l'analyse d'images géoréférencées par un outil algorithmique. Entre 2018 et 2021, le chercheur Sam Conrad Joyce s'est penché sur un nouvel instrument pour lire le territoire. Au sein du *Meta Design Lab* composé de chercheurs tels que Nazim Ibrahim, Verina Cristie et Ahmed Meeran, il a tenté, à partir de la méthode U-Net, de faire émerger, des constats par l'intelligence artificielle sur l'utilisation du sol. Cette méthode, basée sur un algorithme programmé à apprendre à reconnaître des similarités entre des pixels d'une image, était autrefois dédiée à une utilisation médicale (Ronneberger et al., 2015). En effet, le *U-Net* est un algorithme basé sur un réseau neuronal conçu pour analyser, par segmentation, les pixels d'une image. Il repose sur une architecture en « U » doté de deux chemins de données. Il est doté d'un chemin contractant (extraction de caractéristiques) et d'un chemin expansif (reconstruction d'image segmentée) (Ronneberger et al., 2015, p. 235-236). Cette architecture lui permet d'assigner une classe à chaque pixel d'une image. Il applique des opérations de convolution et de mise en commun afin de capturer le contexte global de l'image tout en conservant, avec précision, la localisation de chaque pixel (Ronneberger et al., 2015, p. 235). Sommairement, le U-Net était principalement utilisé pour le suivi de la segmentation cellulaire dans les images de microscopes optiques et pour la détection de tissus ou de tumeurs cancéreuses peu visibles sur les images d'IRM des patients (Ronneberger et al., 2015, p. 238-240).

Dans le cadre des recherches menées par le *Meta Design Lab*, cette méthode d'analyse a été appliquée à une échelle plus large, celle du territoire. En effet, de manière à étudier l'occupation du sol d'aéroports, et leur impact immédiat sur leur environnement, Sam Conrad Joyce a utilisé le *U-Net* pour analyser des images géoréférencées. (2021). C'est ainsi que le groupe de recherche a été en mesure d'analyser plus de 1000 images satellites illustrant les 1000 aéroports les plus fréquentés du monde. Chacune des images satellites de ces aéroports couvrait une superficie de 100 km² et provenait de données satellites ouvertes obtenues sans frais via *Open Satellite APIs*. L'objectif, nommé par l'auteur, était d'automatiser le processus afin de constituer une base de données massive permettant une analyse systématique et comparative à grande échelle. Une fois le modèle entraîné, à partir de 50 images, ce dernier a été déployé sur les 950 autres qui composaient l'échantillon, ce qui permet une classification automatique des zones bâties, des friches et des surfaces naturelles (végétation, eau) (Joyce, 2021, p. 136-138).

À la suite de cette opération, en post-traitement, l'algorithme *Flood Fill* a été utilisé pour raffiner les observations réalisées à l'aide de la méthode *U-Net*. Grâce à cette étape supplémentaire, l'équipe de recherche a pu identifier les zones les plus viables pour l'agrandissement des aéroports en minimisant leur impact sur le territoire évitant autant que possible les conflits avec l'environnement urbain et les écosystèmes existants. (Joyce, 2021, p. 138). Concrètement, le *Flood Fill* a permis de repérer automatiquement les plus grandes surfaces vides contiguës en éliminant les petites parcelles isolées, facilitant ainsi l'identification d'emplacements adaptés à l'implantation de nouvelles infrastructures comme les pistes d'atterrissage (Joyce, 2021, p. 138). Comme mentionné par l'auteur, cet outil possède un potentiel non négligeable pour améliorer les phases préliminaires d'analyse d'un projet urbain grâce à l'automatisation des démarches de lecture spatiale qu'il propose. En minimisant les tâches répétitives et en accélérant le traitement de larges ensembles de données, cet outil pourrait favoriser une prise de décision plus rapide et mieux informer (Joyce, 2021, p. 138 & 158). Malgré que cette recherche se soit spécifiquement concentrée sur l'analyse d'infrastructures aéroportuaires, elle ouvre la voie à une série d'applications dans le domaine de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire. L'utilisation de ce type d'algorithmes pourrait offrir la possibilité d'évaluer l'évolution du couvert végétal, d'identifier des zones de croissance urbaine ou encore d'optimiser les réseaux de transport d'un territoire donné.

2. Un atlas interactif du potentiel solaire et végétale des toitures urbaines

Wu, A. N., & Biljecki, F. (2021). *Roofpedia : Automatic mapping of green and solar roofs for an open roofscape registry and evaluation of urban sustainability. Landscape and Urban Planning, 214, 104167.* <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104167>

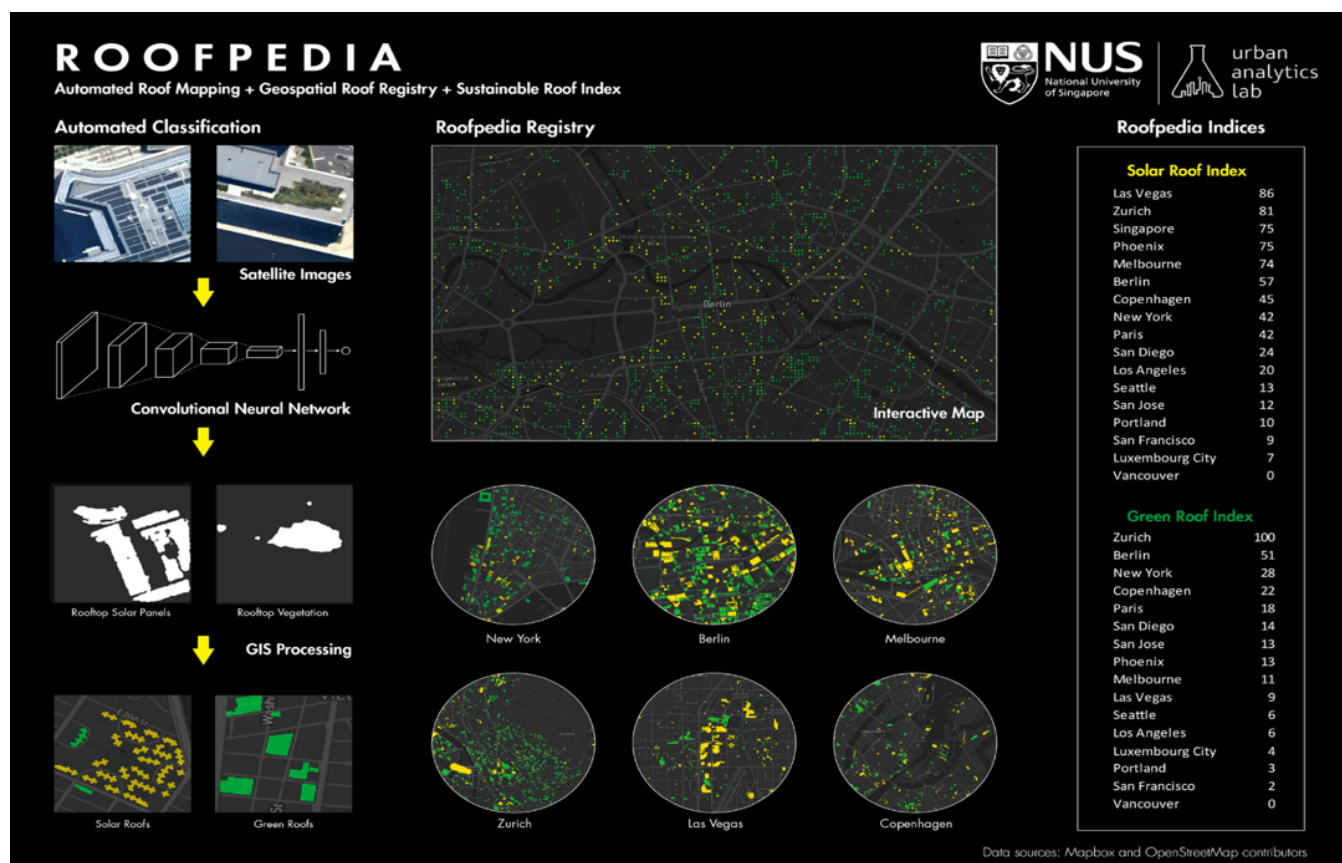


Figure 3: Wu et Biljecki. 2021, Roofpedia, p.3

Bien qu'ils puissent nourrir et guider des processus conceptuels à une échelle territoriale plus large, les outils d'IA, se nourrissant d'imagerie satellite, comme mentionné par Sam Conrad Joyce peuvent aussi servir à identifier des contraintes ou des problématiques propres à un environnement urbain (2021). S'inscrivant dans l'idéologie du *GeoAI* et de la télédétection urbaine, Filip Biljecki et ses collègues ont utilisé l'intelligence artificielle pour cartographier des milliers de toits à travers le monde (Biljecki, 2023, p. 2). Ses travaux, menés dans le cadre des recherches du groupe Urban Analytics Lab de l'Université Nationale de Singapour, avaient pour objectif de cartographier et analyser les toits de cette ville afin d'évaluer leur potentiel comme acteurs dans la production d'énergie et de verdissement urbain. Pour effectuer cette tâche, le groupe de recherche s'est appuyé sur une combinaison de données géospatiales et une approche algorithmique avancée. Un croisement entre des images satellites haute définition et des données du cadre bâti disponibles sur *OpenStreetMap* ont permis de segmenter les images et de concentrer l'analyse sur les toits des bâtiments. Ensuite, pour détecter ceux dotés de toitures solaires et végétalisées, un réseau neuronal a été entraîné. Ce dernier est un réseau de neurones convolutifs basé

sur l'architecture du *U-Net* décrit plus haut, et a permis d'analyser les caractéristiques de chaque toiture de l'échantillon grâce à l'extraction automatisée de celles-ci par le modèle (Wu & Biljecki, 2021, p. 7). Ensuite, avec la segmentation d'images, l'algorithme encodeur *ResNet50* a été en mesure d'extraire les caractéristiques propres aux panneaux solaires ainsi qu'aux toitures végétalisées. Grâce à ce croisement, le groupe de recherche s'est retrouvé en mesure de documenter la présence de ce type d'infrastructure sur le territoire, mais aussi d'identifier des secteurs présentant un fort potentiel solaire ou qui pourrait bénéficier d'une meilleure utilisation de ses toitures. (Wu & Biljecki, 2021, p. 10). L'ensemble des résultats de cette étude ont été colligés et regroupés sur une série de cartes, identifiant par un spectre de couleur, le positionnement et les différents types de toiture (solaire ou verte) dans la ville de Singapour. D'ailleurs, dû au potentiel de cet outil, la portée de ce dernier fut étendue à plusieurs villes à travers le monde allant des métropoles denses comme New York et Tokyo à des villes européennes telles que Paris et Zurich (Wu & Biljecki, 2021, p. 5). Cette extension a permis d'établir des comparaisons entre différentes régions en fonction de critères tels que l'ensoleillement, les politiques d'incitation ou la disponibilité d'espaces verts (Wu & Biljecki, 2021, p. 12)

De ces résultats, une plateforme libre d'accès, nommée "Roofpedia", fut mise en ligne, permettant aux chercheurs, urbanistes et décideurs politiques d'accéder aux données analysées et de les exploiter pour des études comparatives ou des projets d'urbanisme durable (Wu & Biljecki, 2021). Cette plateforme, relativement simple dans sa présentation, se présente sur un site web associé à l'université nationale de Singapour. Une fenêtre de type « Mapbox » basé sur *OpenStreetMap*, permet aux professionnels de l'aménagement de naviguer à travers le monde et d'observer toutes les villes où cet exercice a été réalisé. Sur ces villes, l'observateur se voit confronté à une série de points formant un spectre de couleur, du jaune au vert, qui permet d'afficher le résultat de chacune des toitures analysées. De ces résultats, un classement est effectué entre chaque ville où ce type d'information a été répertorié. À titre d'exemple, Zurich figure au premier rang des villes présentant des toitures vertes et solaires, tandis que Vancouver occupe la dernière place. Bien que cette plateforme offre un portrait sur une série de villes, les données auxquelles les chercheurs ont accès semblent encore limitées. En effet, dans leur analyse, ce sont seulement certains secteurs des villes mentionnées qui sont analysés. Les chercheurs soulignent que ces zones ont été choisies aléatoirement en fonction de leur représentativité des typologies locales (Wu & Biljecki, 2021, p. 5). Pour New York, une seule section du sud de l'île de Manhattan et de Brooklyn est comptabilisée. Avec ces zones d'analyse, il convient de se demander si ces résultats sont réellement représentatifs.

3. Mesure par avis géoréférencés de la qualité des espaces urbains

Marsillo, L., Suntorachai, N., Karthikeyan, K. N., Voinova, N., Khairallah, L., & Chronis, A. (2022). Context Decoder—Measuring urban quality through artificial intelligence. 237-246. <https://doi.org/10.52842/conf.eacaade.2022.2.237eco>

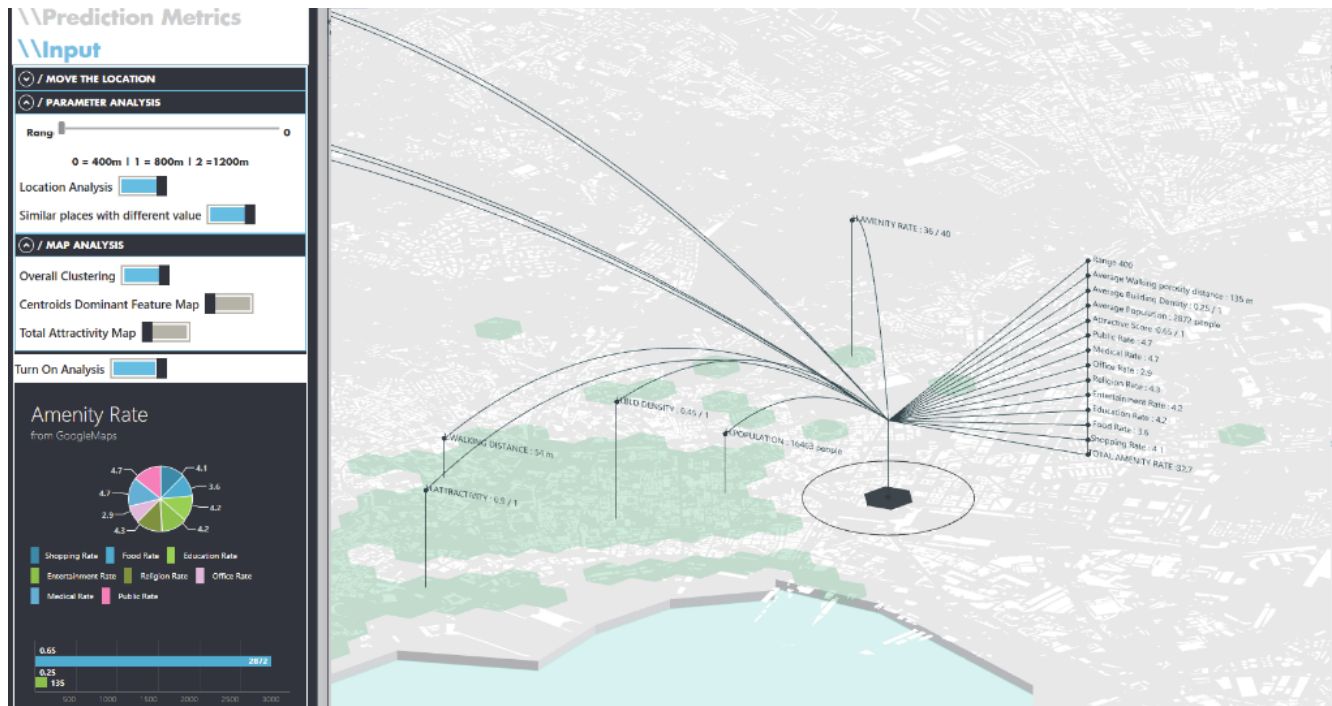


Figure 4: Marsillo. 2022, Context Decoder, p.9

Les instruments qui ont été présentés jusqu'à présent sont principalement des outils algorithmiques visant à traiter et mesurer des données quantifiables à partir d'images et de données brutes. Toutefois, comme mentionné au début de cet essai, certains auteurs tels que Yuhao Kang ont soulevé des doutes quant aux capacités de l'intelligence artificielle à comprendre et interpréter les dimensions subjectives du design urbain (Kang et al., 2019). Laura Marsillo, par l'article « Context Decoder – measuring urban quality through artificial intelligence » s'est attardé à cette dimension et propose un outil pour lire et analyser la perception des habitants d'une ville sur leur cadre bâti. En 2022, la chercheuse affiliée à l'Institut d'Architecture avancée de Catalogne a entrepris le développement d'un nouvel outil permettant l'analyse des qualités urbaines (Marsillo et al., 2022, p. 237-238). Le *Context Decoder* est une plateforme d'apprentissage machine conçu pour analyser et visualiser la qualité urbaine d'un environnement en se basant sur des données géospatiales croisées à des données issues de réseaux sociaux. Avec cette plateforme, l'objectif de la chercheuse était de proposer un outil permettant l'évaluation des qualités urbaines d'un milieu dès les premières étapes d'un processus de conception. Elle cherchait aussi à identifier des liens entre des comportements sociaux et le tissu urbain tout en permettant la comparaison entre différentes zones d'un territoire donné (Marsillo et al., 2022, p. 237). « Notre hypothèse est qu'il existe une certaine corrélation entre le tissu

urbain spatial et les modèles de comportement social. » T.l..(Marsillo et al., 2022, p. 238). Principalement, l'outil se nourrit de deux grandes familles de données. Il traite des données géoréférencées qui offrent de l'information sur les caractéristiques physiques de l'entité urbaine étudiée ainsi que des données sociales reliées aux perceptions des habitants. Respectivement, les sources alimentant ces outils sont *OpenStreetMap* et *EnergyPlus Weather*, qui permettent de capter l'évolution spatiale et climatique des lieux dans le temps. *Google Maps API* et *Twitter API* (aujourd'hui X) fournissent quant à eux, des données géolocalisées dotées de marqueurs temporels explicites, tels que les dates d'émission de tweets ou les mises à jour d'avis utilisateurs, ce qui rend possible une lecture dynamique et évolutive des perceptions urbaines de manière géolocalisées (Marsillo et al., 2022, p. 240-241). De manière à demeurer pertinent, l'outil a été conçu pour se mettre à jour en temps réel. Ces données sont récoltées grâce à une application de type Python (Marsillo et al., 2022, p. 241 & 245). Pourquoi s'attarder à l'avis des gens ? Selon l'auteure, ces sources d'informations permettent de saisir la manière dont les habitants perçoivent leur environnement, en révélant, à travers leurs émotions, leur perception de leur milieu de vie (2022, p. 238).

De manière à illustrer le potentiel de cette plateforme, Naples en Italie a été utilisée comme ville test. Par l'utilisation d'un algorithme *K-Means*, les données géospatiales et sociales récoltées pour cette ville ont été regroupées en cinq zones selon leur similarité permettant ainsi l'identification de relations sous-jacentes entre les caractéristiques du tissu urbain et les perceptions citoyennes (Marsillo et al., 2022, p. 242-243). Les indicateurs qui ont été utilisés pour mesurer la qualité urbaine de la ville sont : la connectivité urbaine, la « marchabilité » (400m-800m-1200m), la densité urbaine et habitée ainsi que le confort thermique des habitants. Par le croisement des données géospatiales et sociales à ces critères, les chercheurs ont été en mesure d'établir un ordre d'attractivité entre les 5 zones (Marsillo et al., 2022, p. 241-243). Le centre-ville historique s'est retrouvé en tête de liste tandis que les territoires résidentiels de type banlieue se sont retrouvés au bas de celle-ci. Bien que ces résultats ne soient pas très surprenants tenant compte du fait que les principaux points d'intérêts se retrouvent dans l'arrondissement historique, qui est plus susceptible de générer des avis positifs à l'égard de son environnement, cette simulation a permis de valider la méthodologie alimentant le *Context Decoder*. Enfin, pour visualiser les analyses de cet outil, il n'existe pas encore de plateformes dédiées à la représentation des informations qu'il procure. Toutefois, il peut être utilisé comme une extension au logiciel Rhino et Grasshopper en utilisant l'application *Web Three.js* parallèlement à un serveur spécifique nommé *Rhino.Compute*. À l'aide d'un scripte qui lui est propre, l'application permet de représenter les données provenant de l'algorithme *K-Means* nourrissant l'outil (Marsillo et al., 2022, p. 9). L'information se voit ainsi modélisée en trois dimensions dans l'interface Rhino qui permet de localiser et retrouver l'information à l'échelle de la ville.

4. La lecture géoréférencée des émotions humaines comme outil d'analyse

Kang, Y., Jia, Q., Gao, S., Zeng, X., Wang, Y., Angsuesser, S., Liu, Y., Ye, X., & Fei, T. (2019). Extracting human emotions at different places based on facial expressions and spatial clustering analysis. *Transactions in GIS*, 23(3), 450-480. <https://doi.org/10.1111/tgis.12552>

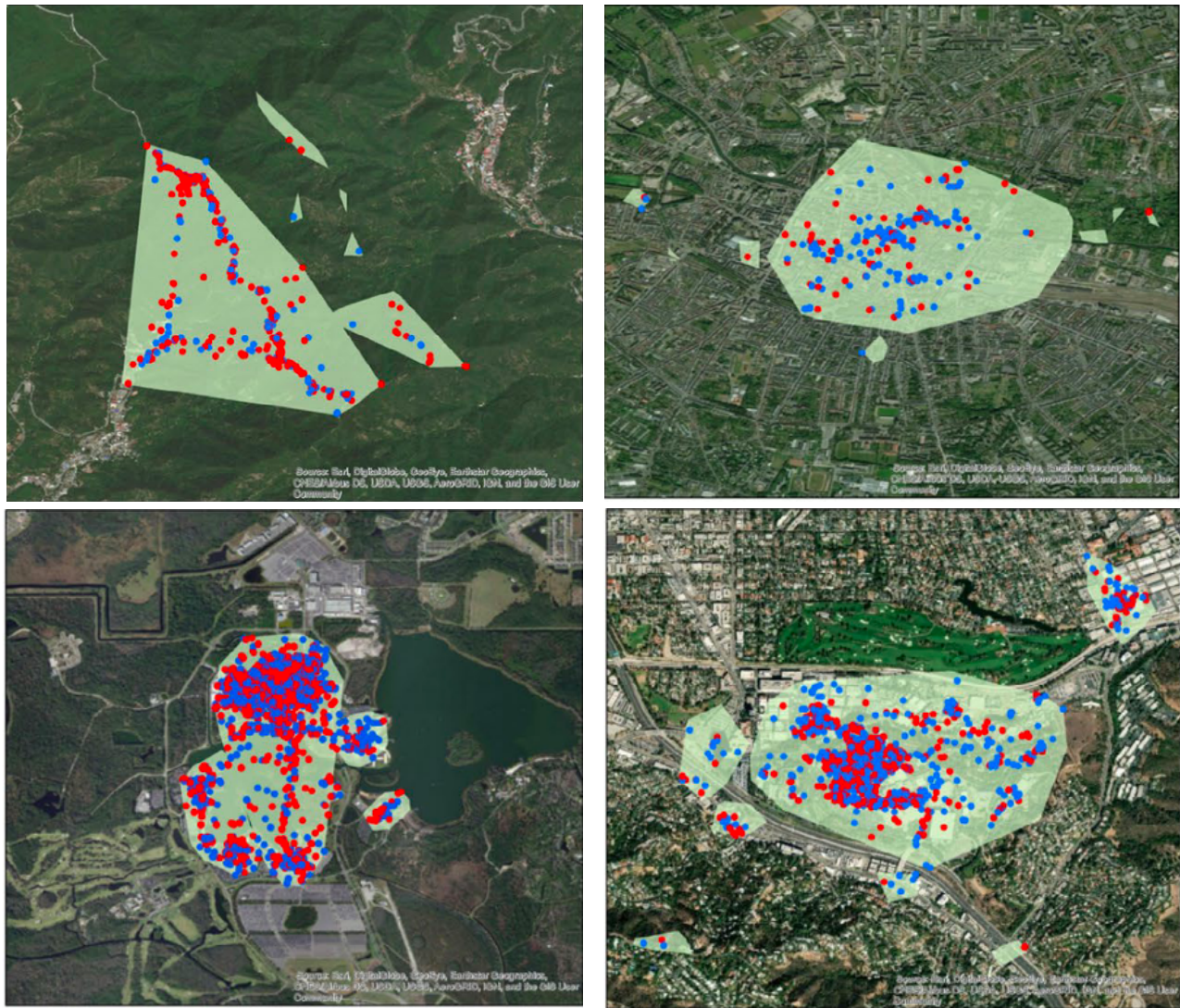


Figure 4 : Kang & al. 2019, The spatial distribution of Flickr photos with smiling faces and without smiling faces and their most frequent word tags across four sample tourist sites, p.465

En aménagement du territoire et en design urbain, la lecture ainsi que l'analyse d'émotions et de sentiments à l'égard d'une rue ou d'un quartier soulève une série d'enjeux méthodologiques et épistémologiques. En effet, ce type de données est difficilement relevable et quantifiable. La perception d'un individu sur son environnement immédiat est enracinée dans ses expériences individuelles et peut être influencée, voir biaisé par sa propre subjectivité et ses mécanismes d'auto-interprétation qui lui sont propres. Encore aujourd'hui, les modes de

consultation s'appuient principalement sur des approches traditionnelles basées sur des enquêtes s'alimentant grâce à une série de questionnaires. Cette façon de faire mobilise d'importantes ressources humaines et peut nécessiter des investissements financiers considérables. Ce mode consultatif soulève également des défis en matière d'analyse qualitative, notamment lorsqu'il s'agit d'interpréter les dimensions émotionnelles des réponses. En effet, l'expression des émotions dans le langage peut varier d'une culture à une autre. Les mots choisis peuvent ne pas avoir le même impact. Aussi, le langage écrit, souvent utilisé dans ces démarches, est généralement formulé après un temps de réflexion ; ce qui peut se traduire en une altération de la spontanéité dans l'expression de l'avis des gens (Kang et al., 2019, p. 452-453). C'est pour ces raisons que le chercheur Yuhao Kang et ses collègues se sont intéressés à la lecture d'émotions des citoyens par l'utilisation de logiciels d'IA permettant d'effectuer une lecture faciale et émotive de manière géoréférencée (2019, p. 450). En somme, leur objectif était « *d'investiguer les émotions humaines dans les lieux et explorer les facteurs environnementaux potentiellement influents* » (Kang et al., 2019, p. 451). De cet objectif deux sous questions ont émergé et on a guidé le processus de recherche. La première s'intéressait à comment calculer et quantifier des émotions humaines prises à partir de différents lieux. La seconde cherchait à établir comment certains facteurs propres à des environnements spécifiques pouvaient avoir un impact sur les émotions d'un individu (Kang et al., 2019, p. 451-452). Afin de répondre à l'ensemble de ces interrogations, ils ont proposé la création d'un cadre d'analyse basé sur le contenu généré par les utilisateurs (UGC). Ce dernier leur a offert l'opportunité de calculer un pointage d'émotions humaines associées à des lieux géoréférencés en s'appuyant sur la reconnaissance des expressions faciales et des techniques de regroupement (Kang et al., 2019, p. 452-454). La première étape du cadre méthodologique a consisté à mettre en place un système de collecte de données. Plus de 6 millions de photos géolocalisées ont été extraites à partir de la plateforme Flickr, accompagnées de métadonnées telles que les coordonnées GPS, la date, l'identifiant de l'utilisateur et des mots-clés associés. Ces photos ont ensuite été croisées avec une sélection de 80 lieux touristiques identifiés à l'aide de *Google Maps* (Kang et al., 2019, p. 454-462). Ce croisement a permis de relier chaque photo à un lieu spécifique et de recueillir, pour chacun de ces lieux, des informations environnementales comme l'indice de végétation (NDVI), le caractère urbain ou rural du site, la présence ou non de plans d'eau, le type de lieu (parc naturel, musée, site religieux, etc.) (Kang et al., 2019, p. 462-463). La seconde étape visait à reconstruire numériquement les lieux visités à partir des images collectées sur Flickr. Pour cela, les chercheurs ont utilisé un algorithme de regroupement spatial appelé *DBSCAN*, qui leur a permis d'identifier les zones où les photos sont prises en plus grande densité. Cette méthode leur permettait également d'écarter les données non pertinentes telles que les photos mal géolocalisées (Kang et al., 2019, p. 455). La reconstruction numérique des lieux à partir de la banque de données Flickr reflète les endroits où les gens se rassemblent ou prennent le plus de photos. Une fois ces regroupements effectués, des polygones ont été tracés autour de chacune de ces zones à ● **Smiling Face** ● **No-smiling Face** l'aide de ce qu'on appelle une "enveloppe convexe", une méthode simple pour dessiner un contour autour d'un nuage de points. Cela permet de représenter chaque lieu comme une véritable entité géographique (et non comme un simple point), reflétant ainsi plus fidèlement l'espace réellement fréquenté par les visiteurs (Kang et al., 2019, p. 456-457).

La troisième étape de son côté s'est concentrée sur la lecture numérique de ces images. Par l'utilisation de *Face ++ Api*, les chercheurs ont été en mesure d'extraire chacun des 2.4 millions de visages présents sur les photos. C'est un service commercial d'intelligence artificielle spécialisé dans la reconnaissance faciale et l'analyse d'émotions. Les chercheurs soulignent qu'ils se sont tournés vers cette plateforme, notamment dû au fait de sa maturité technologique et sa capacité mathématique à fournir des résultats détaillés pour les émotions relevées. Cet outil d'intelligence artificielle évalue notamment l'intensité du sourire et l'utilise comme vecteur de composante émotionnelle (Kang et al., 2019). De cette lecture, deux indices ont été calculés pour chaque lieu étudié. Le premier, le *Joy Index*, est basé sur un ratio normalisé entre le nombre de visages souriants et non souriants, permettant de capter l'ambiance générale d'un site. Le second, l'*Average Happiness Index (AHI)*, correspond à la moyenne des résultats de bonheur pour tous les visages détectés sur les photos d'un lieu donné, selon une échelle allant de 0 à 100. Ces indices sont ensuite spatialisés, c'est-à-dire qu'ils sont associés aux polygones représentant les lieux visités, afin de pouvoir interpréter les niveaux de bonheur en lien avec les caractéristiques environnementales immédiates (Kang et al., 2019, p. 457-459). Afin d'assurer la validité de leur méthode, les chercheurs ont mis en place une série de tests statistiques visant à vérifier la robustesse de leurs résultats. Dans un premier temps, différentes combinaisons de paramètres de l'algorithme *DBSCAN*, utilisé lors de construction géographique des environnements ont été testés. L'objectif était de vérifier si le classement des lieux selon les indices émotionnels variait en fonction des paramètres choisis. Pour ce faire, ils ont eu recours au coefficient de concordance de Kendall (W) qui est une mesure statistique permettant d'évaluer le niveau d'accord entre plusieurs classements. Les résultats ont démontré une forte stabilité dans les classements obtenus (Kang et al., 2019, p. 459-460). Ensuite, afin de tester la fiabilité des indices émotionnels calculés à partir des visages extraits, les chercheurs ont mobilisé une méthode d'autoamorçage. C'est une méthode d'échantillonnage où les chercheurs ont simulé une série de nouveaux échantillons à partir de ceux qu'ils ont récoltés. Cette technique leur a permis de générer des corrélations indiquant un niveau de fiabilité des résultats s'élevant à 95 % pour chacun des lieux (Kang et al., 2019, p. 460-461). Une fois la stabilité des indices assurée, les chercheurs se sont penchés sur l'analyse des facteurs environnementaux susceptibles d'avoir une influence sur les émotions ressenties. Ils ont examiné la relation entre chaque variable environnementale (présence d'eau, ouverture de l'espace, végétation, urbanité, type de lieu, etc.) et les indices développés dans la recherche (Kang et al., 2019, p. 461-462). Les résultats montrent que certains attributs, comme la présence de végétation ou la lisibilité d'un environnement, sont positivement corrélés aux expressions de joie, tandis que d'autres, comme le caractère religieux d'un ou son degré d'urbanité, sont associés à des scores émotionnels plus faibles. Ainsi, cette dernière étape permet non seulement de valider la méthode employée, mais également de mieux comprendre l'impact de la configuration environnementale d'un lieu sur la dimension émotionnelle de l'expérience urbaine (Kang et al., 2019, p. 466).

Bien qu'aucune plateforme résultante de ce projet n'ait été rendue disponible, il demeure que cette étude démontre la pertinence et l'utilité d'outils d'intelligence artificielle pour lire et analyser la subjectivité émotionnelle des habitants d'un environnement urbain particulier. Utilisant une plateforme déjà existante, éprouvée et largement utilisée — en l'occurrence Face++ API — les chercheurs ont pu témoigner du potentiel émanant du croisement d'outils technologiques complémentaires. En mobilisant des données géoréférencées issues de Flickr, combinées à des techniques de regroupement spatial (DBSCAN), d'analyse faciale automatisée et d'enrichissement environnemental (NDVI, urbanité, etc.), ils sont parvenus à contextualiser finement les émotions captées dans l'espace. Cette articulation méthodologique innovante a permis de démontrer que les expressions faciales détectées sur les photographies géoréférencées peuvent constituer des indicateurs valides d'émotions humaines, tout en générant des données exploitables pour l'analyse spatiale et environnementale des lieux. Toutefois, il convient de mentionner que cette étude présente certaines limites. En effet, les données photographiques utilisées proviennent seulement de la plateforme Flickr qui peut être source de biais quant au profil des utilisateurs, particulièrement leur âge. Aussi, l'outil utilisé se concentre seulement sur le sentiment de joie. Les outils de lectures faciales, au moment de l'étude, ne semblaient pas en mesure de relever la singularité et l'unicité des émotions humaines. De plus, la temporalité n'a pas été prise en compte. Des événements aléatoires (collectes des ordures, nuisances sonores, etc.) ont pu fausser les résultats en générant des sentiments négatifs aux utilisateurs des environnements au moment de la prise de photo (Kang et al., 2019, p. 470-471). Enfin, l'analyse s'est attachée à l'échelle des lieux sans tenir compte des variables internes propres à ses environnements (microclimats, zones spécifiques d'intérêts, etc.). Il est donc difficile d'affirmer que cet outil permet de lire parfaitement l'entité urbaine. Toutefois il témoigne du potentiel de cette méthode qui, probablement, continuera de se développer dans les prochaines années.

5. Lecture par segmentation d'images de la qualité visuelle des rues

Ye, Y., Zeng, W., Shen, Q., Zhang, X., & Lu, Y. (2019). The visual quality of streets : A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(8), 1439-1457. <https://doi.org/10.1177/2399808319828734>



Figure 5 : Ye& al. 2019, Applying a machine learning algorithm to extract key design elements., p.1446

La rue est une entité urbaine perçue et vécue. Elle est l'hôte de rencontre et d'échanges entre les habitants d'un quartier, d'un voisinage, etc. Elle invite les gens à la parcourir et accueille un écosystème urbain propre à elle-même. À travers son aménagement, son atmosphère et sa capacité d'adaptation aux besoins de ses usagers, elle révèle ses qualités urbaines qui façonnent son identité. En 2019, quelque temps avant l'apparition des premiers agents conversationnels, un groupe de chercheurs s'est donné le défi de quantifier ce qui façonne les qualités visuelles des espaces urbains en développant un outil algorithmique fonctionnant grâce aux principes d'apprentissage machine (Ye et al., 2019, p. 1440). Ce groupe de recherche, composé de 5 chercheurs provenant de Chine, Hong Kong et Singapour ont réuni des expertises complémentaires en urbanisme, en architecture, en intelligence artificielle et en visualisation urbaine (Ye et al., 2019, p. 1439). L'objectif de l'article *The visual quality of streets: A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images* était de développer une méthode quantitative pour mesurer la qualité visuelle perçue des rues et ce à grande échelle. Cet objectif était motivé par deux principaux enjeux identifiés par les auteurs. D'une part, dans leur pratique, les urbanistes devraient disposer de guides capables de mesurer de manière objective et systématique les qualités visuelles et architecturales des paysages urbains en s'appuyant sur des attributs concrets du design urbain tel que l'architecture des bâtiments formant ces lieux, la présence de végétation et la présence de zones piétonnes. D'autre part, ils insistent sur la nécessité de rendre cette évaluation rapide et applicable à une plus grande échelle territoriale. Les méthodes traditionnelles étant qualifiées de subjectives et limitées à des échantillons restreints (Ye et al., 2019, p. 1440-1441). Pour répondre à ces enjeux, les auteurs proposent un mode analytique à haute résolution basé sur l'analyse pixel par pixel d'images panoramiques de rues (Ye et al., 2019).

C'est dans cette optique qu'ils ont eu recours à des images de rue, qu'ils ont analysées à l'aide de *SegNet*; un réseau de neurones convolutionnel spécialisé en segmentation sémantique, tout en développant un modèle évaluatif entraîné à partir des jugements comparatifs d'experts en design urbain (Ye et al., 2019, p. 1444-1445).

C'est d'ailleurs l'un des aspects qui se démarque par rapport aux études / plateformes présentées jusqu'à maintenant. En effet, les avis d'experts en design urbain et en architecture ont été recueillis grâce à un programme se basant sur le moteur Java, développé spécifiquement pour l'étude. Cette plateforme a donc permis d'entraîner la machine selon les points de vue d'experts en aménagement qui étaient amenés à comparer des groupes d'images et d'indiquer laquelle présentait, selon eux, un environnement urbain de plus grande qualité (Ye et al., 2019, p. 1446). Les résultats issus de ce mode de comparaison par paires ont ensuite été convertis en résultats quantifiables à l'aide du système de notation Elo. Cette méthode permet de classer les images selon leur qualité visuelle perçue en fonction des critères exprimés par les professionnels consultés. Par la suite, ces résultats ont servi de variable cible pour entraîner un réseau de neurones artificiels (ANN), qui, grâce à ces résultats, étaient en mesure d'associer à chaque image des proportions spécifiques d'éléments visuels extraits automatiquement tels que le couvert végétal, la perceptibilité du ciel, l'architecture des bâtiments, l'espace dédié aux piétons et la diversité des objets urbains (Ye et al., 2019, p. 1447-1448). Ce processus a ainsi permis à l'outil d'intelligence artificielle d'estimer la qualité visuelle d'une scène urbaine en se fondant sur la configuration spatiale résultante des éléments qui la composent. Afin de tester et d'entraîner leur outil, les chercheurs se sont penchés sur la ville de Shanghai. Plus précisément, ils se sont attardés au secteur du centre-ville qui couvre une superficie de 317,2 km². Cette vaste zone leur offrait la possibilité d'avoir plus de 69 137 sites d'étude se répartissant sur 13 672 tronçons de rues. Afin de récolter l'ensemble de l'imagerie nécessaire pour conduire l'analyse, les images ont été collectées sur l'application *Baidu Street View*, un équivalent chinois de la plateforme Google Street View. Plus de 140 000 images ont été collectées, et ce à tous les 40 mètres, ce qui a permis d'offrir aux chercheurs un échantillon couvrant l'ensemble du centre-ville. Le modèle décrit plus haut a par la suite analysé l'ensemble de cet échantillon et a permis aux chercheurs de créer une représentation cartographique rassemblant l'ensemble de ces informations (Ye et al., 2019, p. 1443-1444).

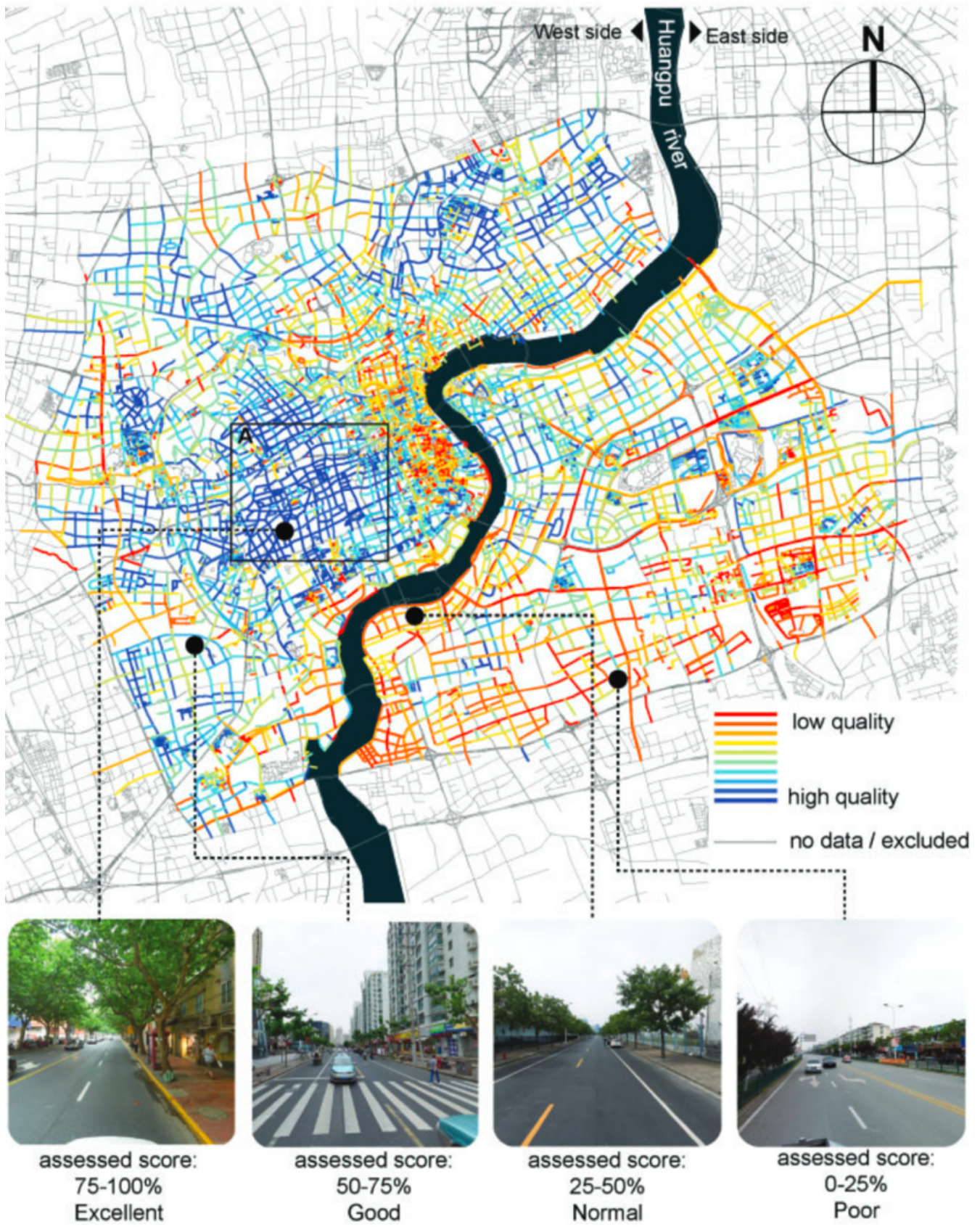


Figure 6: Ye. 2019, The visual quality of streets: A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images, p. 1449.

Afin d'illustrer leurs résultats, les chercheurs ont décidé d'utiliser un gradient de couleur variant du rouge au bleu témoignant du degré de qualité évoluant sur chaque site. Rapidement, cette carte témoigne des différences entre le secteur ouest et est du centre-ville. Les quartiers présentant la plus haute qualité visuelle perçue sont regroupés ensemble et semblent former un pôle / noyau urbain important (Ye et al., 2019, p. 1449) . Pour valider leurs résultats, le groupe de chercheurs a dû œuvrer d'ingéniosité. En effet, la qualité perçue est une notion subjective et il n'existe aucun standard universel permettant de la mesurer. Pour contourner cette limite, ils ont adopté une approche comparative avec des critères d'aménagement présent dans le guide *Shanghai Street Design Guideline*. Ce guide, produit par la ville de Shanghai, énonce des critères de design à atteindre lors de l'aménagement ou la transformation de rues dans la ville. Avec ce guide, ils ont croisé les résultats provenant du modèle et les stratégies provenant de ce guide. Le résultat de cette comparaison fut positif. 27 tronçons de rue identifiés dans le guide produit par la ville ont été classés comme rue présentant un niveau de qualité visuelle excellent. Les chercheurs s'appuient notamment sur cette donnée pour conclure que ce modèle reflète bien le jugement des professionnels de l'aménagement en affirmant qu'une validation totalement objective reste impossible dans ce domaine (Ye et al., 2019, p. 1450). C'est notamment sur ce point que l'article insiste. En effet, les chercheurs reconnaissent clairement les limites de leur étude. Le modèle a été entraîné à partir des jugements de seulement dix professionnels de l'aménagement, tous issus du même contexte culturel et ayant une expérience de vie à Shanghai (Ye et al., 2019, p. 1446). Leur modèle, qui vise à évaluer des qualités urbaines subjectives, repose donc sur des points de vue eux-mêmes subjectifs. Bien que l'expertise des professionnels en aménagement doive être reconnue, il n'en demeure pas moins que l'outil repose sur une lecture humaine de la qualité visuelle. Pour étendre et valoriser l'utilisation de ce type de modèle dans d'autres contextes, l'entraînement devrait probablement être adapté d'une région à une autre, afin de doter l'outil d'un regard culturellement sensible et aligné sur les pratiques locales en matière de design urbain. Finalement, l'outil développé se concentre uniquement sur le visuel de l'espace urbain pour évaluer si ce dernier est de qualité. Ce modèle émet des constats en omettant des critères tels que le bruit et les odeurs qui peuvent avoir un très grand impact sur la qualité d'un lieu. Comme mentionné dans la revue du précédent article, l'ajout de variables à ces modèles qui diffèrent de la lecture d'image par pixel serait pertinent afin d'obtenir un portrait plus global de l'espace urbain analysé. (Ye et al., 2019, p. 1453-1454).

6. Un indice de « marchabilité » enrichi par l'analyse micro-environnementale automatisée

Ki, D., Chen, Z., Lee, S., & Lieu, S. (2023). A novel walkability index using google street view and deep learning. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104896. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104896>

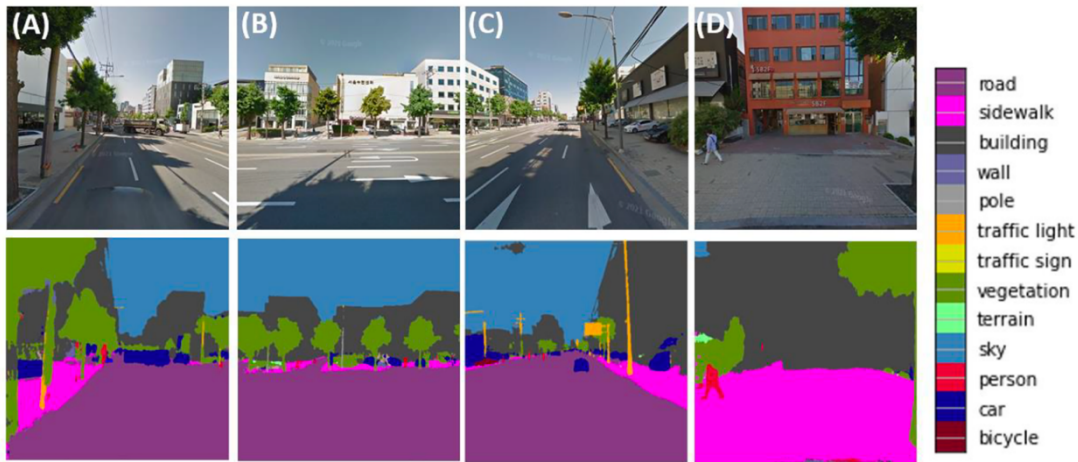


Figure 7: Ki et al. 2023, Example of Semantic Segmentation and Proportion of Major Features, p. 6

Dans les dernières années, de nombreux outils ont été développés pour évaluer la connectivité urbaine de destinations précises. Pensons notamment au *Walk-Score*, une plateforme qui s'est imposé comme point référence dans le domaine de l'aménagement. Utilisé dans de nombreuses études et même intégré dans une série de plateformes immobilières, cet indice est aujourd'hui perçu par plusieurs comme un véritable critère de connectivité urbaine. Toutefois, malgré sa popularité, plusieurs recherches ont remis en question sa capacité à refléter fidèlement l'expérience vécue des piétons. En effet, des écarts notables ont été observés entre les résultats mis de l'avant par le *Walk-Score* et la satisfaction subjective des usagers quant à la qualité de leur environnement piétonnier (Ki et al., 2023, p. 1). C'est pourquoi, Ki Dongwhan, doctorant en planification urbaine et régionale à l'Université d'État de l'Ohio a tenté, avec une équipe de chercheurs, de construire un nouvel indice de « marchabilité » intégrant des attributs micro afin de mieux évaluer le degré de satisfaction des piétons à l'égard de certains tronçons de rue (Ki et al., 2023, p. 3). C'est ainsi qu'ils se sont attardés à la création d'un outil prenant compte de la complexité visuelle d'un environnement, du pourcentage de visibilité de ses trottoirs, de sa densité construite et de son indice d'inclinaison. Ces variables se sont ainsi ajoutées à celle déjà mise de l'avant par des outils de type *Walk-score* qui tiennent compte de la densité, de la diversité des usages, de l'accessibilité aux destinations, de la distance aux transports publics et de la connectivité d'un environnement à son réseau viaire (Ye et al., 2019, p. 6-8). Afin d'utiliser les données nécessaires au bon fonctionnement de leur outil, les chercheurs se sont appuyés sur un vaste sondage réalisé par la ville de Séoul en 2014-2015 portant sur les habitudes piétonnières de ses habitants. Cette enquête, menée sur 1 642 emplacements, a permis de recueillir les réponses de 34 650 participants, fournissant ainsi un jugement subjectif précieux sur la satisfaction des usagers à l'égard de leur environnement de marche immédiat (Ki et al., 2023, p. 3-4). Ces données ont permis d'entraîner le modèle et de

valider la démarche algorithmique proposée. Pour développer leur outil, les chercheurs ont extrait des caractéristiques du cadre bâti à partir d'images urbaines issues de *Google Street View*. Ces images ont ensuite été segmentées à l'aide du modèle de segmentation sémantique *Deeplabv3+*, un réseau de neurones profond préentraîné, reconnu pour sa précision et déjà utilisé dans des travaux similaires en aménagement du territoire. Cette méthode a permis un traitement systématique des images captées tous les 10 mètres dans un rayon de 50 mètres autour des emplacements de sondage. À partir de ces images segmentées, les chercheurs ont pu extraire plusieurs variables micro-environnementales, telles que la proportion de verdure, la complexité visuelle ou la largeur des trottoirs. Chaque variable a ensuite été pondérée en fonction de sa contribution à la satisfaction piétonnière, grâce à un algorithme d'apprentissage automatique de type *Random Forest* (Ki et al., 2023, p. 5-7).

Ce type d'algorithme construit une série d'arbres de décisions à partir d'échantillons aléatoires provenant des données recueillies, puis combine leurs prédictions pour identifier de manière fiable quelles caractéristiques de l'environnement, qui, dans le cadre de cette recherche, influencent le plus la satisfaction des piétons. Enfin, ces variables pondérées ont été combinées avec les composantes macros utilisées dans l'outil *Walk-Score* ce qui a permis de générer un nouvel indice de « marchabilité » intégrant à la fois des dimensions objectives classiques et des perceptions issues de la morphologie visuelle d'un environnement. Ainsi, le nouvel indice proposé, se révèle, selon les auteurs, supérieur au *Walk-Score* parce qu'il intègre des dimensions perçues directement par les usagers, tout en reposant sur des données visuelles objectives extraites automatiquement à partir d'images de *Google Street View* (Ki et al., 2023, p. 7-10). Bien que cette étude propose un indice de « marchabilité » tenant compte de nouveaux facteurs, les auteurs reconnaissent certaines limites importantes. D'abord, le modèle repose sur des images statiques de *Google Street View*, ce qui signifie que seuls les éléments visibles à un moment ponctuel de la journée ont été pris en compte (Ki et al., 2023, p. 11). À titre d'exemple, cette dimension statique n'intègre pas les variations saisonnières, les conditions météorologiques ou les dynamiques temporelles qui peuvent influencer la qualité d'un espace public. Ensuite, bien que le modèle *Deeplabv3+* fournisse une segmentation précise, la classification automatique peut parfois se voir limitée par des contraintes méthodologiques et d'accessibilités aux données (Ki et al., 2023, p. 11). Par ailleurs, l'indice développé est testé uniquement dans le contexte urbain de la ville de Séoul. Il s'agit d'une ville dense, bien équipée en infrastructures piétonnes et avec une culture de la marche déjà présente dans la population. Les auteurs soulignent donc que la polyvalence du modèle reste à valider, car les contextes urbains changent d'une ville à une autre (Ki et al., 2023, p. 11). Bien que des résultats soient disponibles pour la ville de Séoul, il n'existe pas de plateforme de visualisation universelle pour cet index tenant compte du fait que ce processus doit être réalisé pour chaque ville désirant avoir son index de « marchabilité » adapté. Cela dit, cette recherche marque une avancée méthodologique importante en matière d'évaluation des qualités des parcours piétons, ce qui ouvre la voie à des outils plus sensibles aux réalités perçues du terrain.

VII. Synthèse

Cette section présente une discussion ainsi qu'une analyse comparative, sous forme de tableaux, des 6 outils présentés dans le cadre de cette recherche. De par ce regroupement, un portrait global des caractéristiques de chaque instrument est possible. Par cette juxtaposition des similitudes émergent et sont discutées dans la présente section.

Tableau synthèse 2

Identification			Fonctionnement					Interface
# article	Référence bibliographique	Institution	Données entrées	Lecture par réseau neuronal	Algorithme de traitement de données	Tâches	Données sorties	Réelle ou potentielle
1	<i>Joyce, S. C. (2021). AI as a collaborator in the early stage of the design. Dans I. As & P. Basu (Éds.), The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture (1^{re} éd., p. 130-159). Routledge.</i> <i>https://doi.org/10.4324/9780367824259-</i>	• Université de technologie et de design de Singapour • Institut technologique du Massachusetts (États-Unis)	• 1000 images satellites provenant de <i>Open Satellite APIs</i>	• U-Net	• Algorithme Flood Fill	• Segmentation numérique des pixels d’une image pour extraction d’éléments clés	• Extraction de zones territoriales pour analyse comparative et prospective.	• Prototype exploratoire seulement. Aucune plateforme n’est disponible.
2	<i>Wu, A. N., & Biljecki, F. (2021). Roofpedia : Automatic mapping of green and solar roofs for an open roofscape registry and evaluation of urban sustainability. Landscape and Urban Planning, 214, 104167.</i> <i>https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104167</i>	• Université nationale de Singapour (Singapour)	• Imagerie satellite de 17 villes dans le monde	• Réseau neuronal convolutif (CNN) basé sur architecture U-Net	• ResNet50	• Segmentation numérique des pixels d’une image pour extraction d’éléments clés	• Détection automatique des toits verts et solaires d’une ville. • Croisements de ces identifications avec données SIG pour géolocalisation de ceux-ci.	• Base de données interactive Roofpedia • https://ual.sg/project/roofpedia/
3	<i>Marsillo, L., Suntorachai, N., Karthikeyan, K. N., Voinova, N., Khairallah, L., & Chronis, A. (2022). Context D der—Measuring urban quality through artificial intelligence. 237-246.</i> <i>https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.2.237eco</i>	• Institut pour l’architecture avancée de Catalogne (Espagne)	• OpenStreetMap • Google Maps API • Twitter API • Energyplus	• Aucun réseau neuronal n’a été entraîné pour cette recherche	• K-means clustering	• Croisement de données géospatiales avec avis géoréférencés.	• Évaluation des qualités urbaines • Comparaison entre attractivité perçue de différents territoires	• Visualisation spatiale des résultats via l’application Rhino/Grasshopper
4	<i>Kang, Y., Jia, Q., Gao, S., Zeng, X., Wang, Y., Angsuesser, S., Liu, Y., Ye, X., & Fei, T. (2019). Extracting human emotions at different places based on facial expressions and spatial clustering analysis. Transactions in GIS, 23(3), 450-480.</i> <i>https://doi.org/10.1111/tgis.12552</i>	• Université du Wisconsin (États-Unis) • Université de Wuhan (Chine)	• 6 millions de photos Flickr. • 2.4 millions de visages géoréférencés	• Aucun réseau neuronal n’a été entraîné pour cette recherche.	• DBSCAN	• Extraction des émotions perçues via l’utilisation d’une application de reconnaissance faciale.	• Lecture et analyse des perceptions émotionnelles des citoyens à l’égard de leur environnement.	• Prototype exploratoire seulement. Aucune plateforme n’est disponible.

			• Attributs spatiaux de 80 sites touristiques mondiaux	Utilisation de FACE ++ qui s'appuie sur des réseaux neuronaux		• Création d'un indice de bonheur géoréférencé	• Contextualisation des émotions captées. • Étude des qualités d'un lieu	
5	Ye, Y., Zeng, W., Shen, Q., Zhang, X., & Lu, Y. (2019). The visual quality of streets : A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images. <i>Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science</i> , 46(8), 1439-1457. https://doi.org/10.1177/2399808319828734	• Université Tongji(Chine) • Institut des technologies avancées de Shenzhen (Chine)	• 140 000 images provenant de Baidu Street View	• Réseaux neuronaux convolutifs (CNN) de type SegNet • Réseau neuronal ANN entraîné avec avis d'experts aménagement	• Aucun algorithme spécifique n'est mentionné	• Segmentation numérique des pixels d'une image pour extraction d'éléments clés	• Évaluation de la qualité visuelle de tronçons de rue (cadre bâti, aménagements, etc.)	• Plateforme de visualisation et de collectes de données conçues pour consulter des experts en aménagement du territoire. Cette dernière n'est pas disponible pour le grand public.
6	Ki, D., Chen, Z., Lee, S., & Lieu, S. (2023). A novel walkability index using google street view and deep learning. <i>Sustainable Cities and Society</i> , 99, 104896. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104896	• Université de l'Ohio (États-Unis) • Université Hanyang (Corée du Sud)	Google Street View Enquête Satisfaction piétonne Séoul	• Réseau de neurones profonds • Deeplabv3+,	• Random Forest	• Segmentation numérique des pixels d'une image pour extraction d'éléments clés	• Extraction des attributs micro-environnementaux de lieux clés pour intégration à index de « marchabilité » adapté.	• Outils de visualisations cartographiques pour Séoul • Aucune plateforme grand public n'est disponible en tenant compte du fait que le processus doit être réalisé pour chaque ville.

Discussion

Cet essai, du fait de sa forme et son contenu, a permis de regrouper six instruments utilisant des données géoréférencées et des algorithmes ayant le potentiel de proposer de nouvelles applications offrant une meilleure compréhension des milieux de vie urbains. Que ce soit pour les décideurs publics, les professionnels de l'aménagement (urbanistes & des designers urbains) ou les architectes, les outils utilisant l'intelligence artificielle permettent une lecture enrichie des dynamiques territoriales grâce à l'exploitation de données massives. Dans la contextualisation de cette recherche, une attention a été portée à la perception des futurs utilisateurs et des enjeux menant à l'intégration et l'acceptation de ces outils dans des milieux professionnels. Il convient de mentionner que l'analyse des six articles révèle que ces outils offrent des perspectives concrètes pour optimiser les processus d'analyse en aménagement du territoire. Ces derniers offrent notamment la possibilité d'automatiser l'analyse territoriale à grande échelle, d'inclure des données dynamiques dans la lecture de la ville et d'intégrer des perceptions citoyennes sans l'élaboration de grandes enquêtes sur le territoire. C'est ainsi qu'il semble juste d'affirmer, qu'en apparence, l'échantillon s'oriente autour d'un objectif commun : améliorer les processus de conception et de prise de décision en aménagement du territoire tout en offrant des outils objectifs permettant un dialogue entre différents jeux de données hétérogènes. Leur potentiel est indéniable. Toutefois, la crainte de voir certains biais urbanistiques répétés par les algorithmes demeure fondée et cette recherche n'a pas permis de l'écarter. Comme évoqué précédemment, ces outils ne génèrent pas de nouvelles données, mais construisent un portrait du territoire à partir d'informations existantes. Ils servent de médiateurs entre diverses sources et orientent les utilisateurs sur la base de cas documentés. Un des exemples les plus pertinents pour appuyer cette observation est l'outil d'analyse développé par Joyce dans la recherche *AI as a collaborator in the early stage of the design* (Joyce, 2021). L'instrument, se concentrant sur l'analyse d'infrastructure aéroportuaire, permet l'identification de zones d'agrandissements potentiels pour d'autres aéroports dans le monde. L'algorithme arrive à ses recommandations en se basant sur l'analyse de cas existants. Dans ce contexte, il devient essentiel de promouvoir l'intégration de ces outils en tant qu'assistants intelligents au service des professionnels de l'aménagement. Le jugement humain devrait toujours prévaloir et demeurer critique. Face à ce constat, le rôle décisionnel de l'urbaniste, du designer urbain ou de l'architecte ne sera fort probablement pas diminué, mais plutôt bonifié et optimisé grâce aux capacités de synthèses et de communication des données de ces plateformes. À titre d'exemple, l'outil mis de l'avant dans l'article *The visual quality of streets : A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images* pourrait grandement aider les professionnels, à définir un ordre de priorité dans l'élaboration de travaux d'amélioration et de mise en valeur des rues d'une ville type (Ye et al., 2019). L'outil pourrait être entraîné en fonction des critères mis de l'avant par celle-ci et ensuite il pourrait analyser l'ensemble des rues de cette même ville. Le professionnel pourrait ainsi établir ses priorités à partir d'un portrait global de la qualité visuelle des rues. En s'appuyant sur des observations à grande échelle, ces outils pourraient renforcer la crédibilité de son point de vue auprès de la population et des décideurs publics.

Bien que l'ensemble des instruments présentés semblent converger vers un même objectif, leur analyse détaillée révèle également des spécificités propres à chacun. En effet, les données utilisées et le mode de collecte de ces dernières varient. Selon l'échantillon analysé dans cette recherche, les sources les plus fréquemment utilisées sont *OpenStreetMap*, Google Street View et *Flickr*. Celles-ci présentent l'avantage de s'appuyer sur des données ouvertes et librement accessibles qui sont traitées par des algorithmes dont leurs fonctionnements sont présentés. Ainsi, ce type d'outil permettrait possiblement de réduire les craintes et la méfiance exprimées par certains auteurs, notamment ceux qui soulignent le caractère opaque de ces applications tel que (Sanchez et al., 2023) et (Adadi & Berrada, 2018). De manière à proposer des représentations accessibles et compréhensibles aux utilisateurs, les plateformes misent principalement sur un mode de représentation cartographique adapté et propre à chaque instrument. Qu'elles soient interactives ou statiques, ces dernières rassemblent l'ensemble des informations recueillies en un seul support visuel. Pour les professionnels de l'aménagement et de l'architecture, ce mode de représentation s'avère particulièrement pertinent, car il permet de visualiser une importante quantité de données de manière synthétique et contextualisée. En ce sens, ces cartes constituent un véritable levier pour enrichir et soutenir les démarches de recherche-création. Par exemple dans l'article *Roofpedia : Automatic mapping of green and solar roofs for an open roofscape registry and evaluation of urban sustainability. Landscape and Urban Planning*, l'outil pourrait être utilisé pour guider l'implantation de toitures vertes ou solaire dans un projet d'architecture en permettant la visualisation des attributs d'un quartier accueillant une concentration de ce type d'infrastructures (Wu & Biljecki, 2021). Enfin, ces cartes offrent aux professionnels l'opportunité d'évaluer certaines conclusions du modèle, de les valider ou de les infirmer, grâce à leurs connaissances de contraintes qui pourraient avoir été omises.

Dans le tableau synthèse présent à la page 39, la segmentation numérique des pixels d'une image pour l'extraction d'éléments clés est le mode de fonctionnement le plus présent dans les outils étudiés. En effet, sur 6 articles, 5 présentent des instruments utilisant cette méthode. Cette approche, sur la base d'un principe commun qui vise à isoler certaines zones et former des groupes de pixels, peut servir à plusieurs types d'analyse. Comme il a été détaillé dans les sections précédentes, ce procédé, croisé avec des données géolocalisées, offre l'opportunité de créer un dialogue entre différentes sources d'informations. Que ce soit pour détecter la qualité du cadre bâti, la présence d'objets urbains dans une rue ou pour évaluer l'intensité d'un sourire sur une photo, ces méthodes permettent de dégager une série d'observations à partir d'images denses et complexes. Dans l'article *The visual quality of streets : A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images*, la création d'un algorithme basé sur l'avis d'experts en aménagement a permis d'évaluer la qualité visuelle des rues grâce à une lecture numérique d'images provenant d'un logiciel similaire à Google Street View (Ye et al., 2019). Ce croisement d'informations a offert aux chercheurs l'opportunité de quantifier des qualités perçues. Tandis que dans l'article *Extracting human emotions at different places based on facial expressions and spatial clustering analysis*, par un procédé de reconnaissance faciale, croisé à des données géolocalisées de sites précis, des chercheurs ont pu évaluer le degré de joie des utilisateurs d'un lieu (Kang et al., 2019). Bien que cette recherche présente plusieurs limites, notamment en ce qui concerne l'influence de la temporalité et l'interprétation de la subjectivité des expressions faciales humaines, elle demeure pertinente. Elle ouvre la voie à des procédés d'analyse d'images de haute précision. Enfin, ces deux outils, ainsi que ceux présentés dans le cadre de cet essai, suggèrent en effet une polyvalence non négligeable du procédé de segmentation numérique des pixels d'une image. Afin de favoriser l'adoption de ces outils, il serait souhaitable qu'un seul et même logiciel regroupe plusieurs des fonctionnalités présentes dans les instruments étudiés. L'enjeu serait de créer une forme de consensus parmi les aménagistes quant aux outils à privilégier, afin d'éviter un rejet par ces derniers liés à une surcharge de choix. Ce faisant, il convient de se demander s'il serait possible de pouvoir naviguer dans une représentation numérique d'une ville, où pour chaque tronçon de rue, de l'information sur la qualité de son cadre bâti, son évolution, son indice de marchabilité et ses qualités qui forment son identité seraient accessibles? Cette idée, possiblement déjà en cours d'élaboration, aurait sans doute plus de chances de trouver sa place dans les milieux professionnels que plusieurs applications développées de façon indépendante.

L'orientation des professionnels vers ces outils pose et posera plusieurs enjeux tant qu'il n'y aura pas de méthodes et de modes unifiés. Pourtant, à court terme, ces derniers présentent un potentiel non négligeable qui pourrait aider à informer des processus d'élaboration de visions territoriales. Dans les dernières années, le gouvernement du Québec a révisé et réorienté ses orientations gouvernementales en aménagement du territoire (OGAT). Ce processus, long et issu d'une pluralité de recherches avec plus de 4500 acteurs des milieux municipaux et de l'aménagement du territoire, aurait pu bénéficier d'outils comme ceux présentés dans cet essai (Gouvernement du Québec, 2024, p. 14). En effet, par ce processus d'évaluation, le gouvernement souhaitait « mieux capter les enjeux d'actualité en aménagement du territoire », « mieux arrimer l'aménagement et le développement pour assurer la vitalité des territoires » et « évaluer l'atteinte d'objectifs en assortissant les OGAT d'indicateurs en aménagement du territoire » (Gouvernement du Québec, 2024, p. 9). Les outils présentés auraient pu contribuer de près ou de loin à l'élaboration de ces visions, grâce à des croisements de données innovants (imagerie satellite, données cellulaires & imagerie urbaine) qui se voyaient auparavant presque impossibles à réaliser dû aux immenses échantillons que ce type de données génèrent. La compréhension de certaines réalités ou contraintes spécifiques à un territoire donné aurait, peut-être, permis d'affiner la vision gouvernementale sur son territoire. À titre d'exemple, ces outils visant une application à l'échelle du territoire, à la fois prospective et diagnostic, auraient peut-être été en mesure de guider et d'orienter l'objectif 1.1 qui vise à adapter les milieux de vie aux changements climatiques (Gouvernement du Québec, 2024, p. 35). À l'aide des outils présentés, il aurait probablement été envisageable de documenter l'érosion côtière ou le dépérissement de certaines zones naturelles à partir d'images satellites.

En somme, l'analyse sommative présente dans cet essai a permis de mettre en lumière le potentiel de six outils émergents qui par leur processus algorithmique offrent la possibilité d'enrichir la compréhension territoriale. En explorant différentes approches, il est apparu que ces instruments, encore perfectibles, offrent néanmoins des perspectives prometteuses pour appuyer l'élaboration de visions d'aménagement plus fines, plus objectives et mieux ancrées dans les réalités du territoire.

Conclusion

En conclusion, cet essai de fin d'études en design urbain aura été l'occasion de poser un regard sur un domaine technologique en pleine expansion et qui a le potentiel d'influencer grandement les façons de travailler en aménagement du territoire. En réponse à la question: Quels sont les outils d'intelligence artificielle actuellement discutés dans la recherche scientifique ou utilisée sur le marché ? En quoi ces outils pourraient-ils devenir des instruments de conception architecturale et urbanistique? ; six instruments utilisant l'intelligence artificielle et des données géoréférencées ont été présentés. L'idée était de mettre à nu ces logiciels de manière à pouvoir mieux les comprendre et les exposer à des individus qui n'ont pas nécessairement une compréhension juste de ce qu'est l'IA et de ce qu'elle peut apporter à un domaine spécifique. C'est justement pour cette raison qu'une section de l'essai s'est consacrée à retracer et vulgariser l'évolution de l'IA, permettant ainsi de mieux saisir les principales avancées qui façonnent encore aujourd'hui son développement. Parallèlement, l'étude des perceptions des professionnels à l'égard de ces logiciels a permis de mettre en lumière certaines réticences peu abordées dans leur présentation. Cette revue d'articles a permis de discuter de projets de recherche qui offrent un regard nouveau sur la ville et son territoire. C'est une occasion que tout concepteur devrait saisir pour nourrir, à partir de données objectives, son processus de conception. Ce sujet, étant dans un domaine en pleine expansion, il convient de préciser que les instruments présentés possèdent probablement des équivalents ou des versions plus performantes actuellement en développement. L'accès aux études présentant ces outils, ainsi qu'à celles permettant de les contextualiser, demeure limité en raison de l'émergence de ce domaine. Cette jeunesse a posé une série de défis dans la quête d'informations pertinentes et mené à l'utilisation de procédés de recherches innovants qui eux aussi utilisent l'intelligence artificielle. Finalement, la poursuite de cette recherche, dans un cadre multidisciplinaire élargi, serait souhaitable. En effet, un rapprochement entre les expertises en aménagement du territoire et en architecture ainsi que celles issues du domaine informatique permettrait probablement de conduire une recherche plus précise dans les aspects techniques de ces outils tout en mettant en place un dialogue qui pourrait mener au développement d'un outil ancré dans les besoins du monde de l'aménagement et de l'architecture. Aussi, de manière à avoir un regard actuel sur les perceptions face à l'implantation de telles plateformes dans des milieux professionnels, une future recherche aurait avantage à entreprendre une série d'entrevues avec des acteurs clés du monde de l'aménagement. C'est ainsi que cet essai se présente humblement, non pas comme une première incursion sur le sujet, mais comme une contribution qui, à sa manière, ouvre la porte à des recherches subséquentes dans le domaine.

Bibliographie

Articles recensés

Joyce, S. C. (2021). AI as a collaborator in the early stage of the design. Dans I. As & P. Basu (Éds.), *The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture* (1^{re} éd., p. 130-159). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780367824259-9>

Marsillo, L., Suntorachai, N., Karthikeyan, K. N., Voinova, N., Khairallah, L., & Chronis, A. (2022). *Context Decoder—Measuring urban quality through artificial intelligence*. 237-246. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.2.237>

Kang, Y., Jia, Q., Gao, S., Zeng, X., Wang, Y., Angsuesser, S., Liu, Y., Ye, X., & Fei, T. (2019). Extracting human emotions at different places based on facial expressions and spatial clustering analysis. *Transactions in GIS*, 23(3), 450-480. <https://doi.org/10.1111/tgis.12552>

Ki, D., Chen, Z., Lee, S., & Lieu, S. (2023). A novel walkability index using google street view and deep learning. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104896. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104896>

Ye, Y., Zeng, W., Shen, Q., Zhang, X., & Lu, Y. (2019). The visual quality of streets : A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(8), 1439-1457. <https://doi.org/10.1177/2399808319828734>

Wu, A. N., & Biljecki, F. (2021). Roofpedia : Automatic mapping of green and solar roofs for an open roofscape registry and evaluation of urban sustainability. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104167. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104167>

Monographies

Adadi, A., & Berrada, M. (2018). Peeking Inside the Black-Box : A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI). *IEEE Access*, 6, 52138-52160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870052>

Biljecki, F. (2023). GeoAI for Urban Sensing. Dans S. Gao, Y. Hu, & W. Li, *Handbook of Geospatial Artificial Intelligence* (1^{re} éd., p. 351-366). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003308423-17>

Chernev, A., Böckenholt, U., & Goodman, J. (2015). Choice overload : A conceptual review and meta-analysis. *Journal of Consumer Psychology*, 25(2), 333-358. <https://doi.org/10.1016/j.jcps.2014.08.002>

Demigha, S. (2020). The impact of Big Data on AI. *2020 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 1395-1400. <https://doi.org/10.1109/CSCI51800.2020.00259>

Hovestadt, L. (2020). Big Data & Machine Learning. Dans *Atlas of Digital Architecture : Terminology, Concepts, Methods, Tools, Examples, Phenomena*, (Ludger Hovestadt, Urs Hirschberg and Oliver Fritz, p. 549-590). Birkhäuser.

Ki, D., Chen, Z., Lee, S., & Lieu, S. (2023). A novel walkability index using google street view and deep learning. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104896. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104896>

Li, W., & Hsu, C.-Y. (2022). GeoAI for Large-Scale Image Analysis and Machine Vision : Recent Progress of Artificial Intelligence in Geography. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7), 385. <https://doi.org/10.3390/ijgi11070385>

- Morandín-Ahuerma, F. (2022). *What is Artificial Intelligence*. 3(12).
- ONU. (2022). *Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes—ONU*. <https://www.un.org/fr/desa/world-urbanization-prospects>
- Palmini, O., & Cugurullo, F. (2023). Charting AI urbanism : Conceptual sources and spatial implications of urban artificial intelligence. *Discover Artificial Intelligence*, 3(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s44163-023-00060-w>
- Presbitero, A., & Teng-Calleja, M. (2023). Job attitudes and career behaviors relating to employees' perceived incorporation of artificial intelligence in the workplace : A career self-management perspective. *Personnel Review*, 52(4), 1169-1187. <https://doi.org/10.1108/PR-02-2021-0103>
- Quan, S. J., Park, J., Economou, A., & Lee, S. (2019). Artificial intelligence-aided design : Smart Design for sustainable city development. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(8), 1581-1599. <https://doi.org/10.1177/2399808319867946>
- Reinhard, K., & Schneider, S. (2020). Digital Cities. Dans *Atlas of Digital Architecture : Terminology, Concepts, Methods, Tools, Examples, Phenomena* (Ludger Hovestadt, Urs Hirschberg and Oliver Fritz, p. 529-548). Birkhäuser.
- Roman, M., & Alice_ch3n81. (2022). Play among books : a symposium on architecture and information spelt in atom-letters. In L. Hovestadt & V. Bühlmann (Eds.), *OAPEN (Open Access Publishing in European Networks)*. Birkhäuser. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=3124393>
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net : Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Dans N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells, & A. F. Frangi (Éds.), *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015* (Vol. 9351, p. 234-241). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron : A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6), 386-408. <https://doi.org/10.1037/h0042519>
- Rumelhart, D. E., Hintont, G. E., & Williams, R. J. (1986). *Learning representations by back-propagating errors*. Sanchez, T. W., Shumway, H., Gordner, T., & Lim, T. (2023). The prospects of artificial intelligence in urban planning. *International Journal of Urban Sciences*, 27(2), 179-194. <https://doi.org/10.1080/12265934.2022.2102538>
- Tellios, A., Koulali, P., & Valsamidou, K. (2023). Designing Tomorrow : AI and the Future of Architectural Design Process. *FORUM A+P Interdisciplinary Journal of Architecture and Built Environment*, 27, 22-25. <https://doi.org/10.37199/f40002703>
- Tulumello, S., & Iapaolo, F. (2022). Policing the future, disrupting urban policy today. Predictive policing, smart city, and urban policy in Memphis (TN). *Urban Geography*, 43(3), 448-469. <https://doi.org/10.1080/02723638.2021.1887634>
- Wu, A. N., & Biljecki, F. (2021). Roofpedia : Automatic mapping of green and solar roofs for an open roofscape registry and evaluation of urban sustainability. *Landscape and Urban Planning*, 214, 104167. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104167>

Rapports gouvernementaux

Gouvernement du Québec. (2024). *Orientations gouvernementales en aménagement du territoire pour les MRC des groupes A, B et C*.

Site web

Flume apache. (2025). <https://kafka.apache.org/documentation/>

Kafka apache. (2025). <https://kafka.apache.org/documentation/>

Médiagraphie

Figure 1 : Li& Hsu. 2022, A big picture view of GeoAI, p. 3

Figure 2 : Joyce. 2021, U-Net & Flood-Fill analysis, p. 139-140

Figure 3 : Wu et Biljecki. 2021, Roofpedia, p.3

Figure 4 : Marsillo. 2022, Context Decoder, p.9

Figure 5 : Kang & al. 2019, The spatial distribution of Flickr photos with smiling faces and without smiling faces and their most frequent word tags across four sample tourist sites, p.465

Figure 6 : Ye& al. 2019, Applying a machine learning algorithm to extract key design elements., p.1446

Figure 7 : Ye. 2019, The visual quality of streets: A human-centred continuous measurement based on machine learning algorithms and street view images, p. 1449

Figure 8 : Ki et al. 2023, Example of Semantic Segmentation and Proportion of Major Features, p. 6

Tableau 1 : Boucher, 2025, Articles

Tableau 2 : Boucher, 2025, Articles, plateformes et descriptions

Page couverture : Doyle, 2024, Masques du génie du lieu