

# Phénomènes radiatifs et aérauliques en milieu urbain : comment la géomatique contribue à améliorer leur connaissance et leur prévision ?

## Radiative and Aerodynamic Phenomena in Urban Environments: How Does Geomatics Contribute to Enhancing Our Understanding and Prediction of These Phenomena?

Thomas Leduc<sup>1</sup>, Jérémy Bernard<sup>2</sup>, Thomas Corpetti<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Nantes Université, ENSA Nantes, École Centrale Nantes, CNRS, AAU-CRENAU, UMR 1563, F-44000 Nantes, France. [thomas.leduc@crenau.archi.fr](mailto:thomas.leduc@crenau.archi.fr)

<sup>2</sup> EDYTEM et Lab-STICC, Centre National de la Recherche Scientifique, France. [jeremy.bernard@zaclys.net](mailto:j Jeremy.bernard@zaclys.net)

<sup>3</sup> LETG UMR 6554, CNRS, F-35000 Rennes, France. [thomas.corpetti@cnrs.fr](mailto:thomas.corpetti@cnrs.fr)

**RÉSUMÉ.** La forme de la ville, l'agencement de ses rues, de ses bâtiments et de ses espaces verts peuvent modifier significativement la circulation du vent dans l'espace ouvert et la quantité de rayonnement solaire reçue par les bâtiments et les surfaces. Le vent et le rayonnement affectent directement la surchauffe urbaine et la dispersion des polluants en ville, et par conséquent la qualité de l'environnement urbain et le confort des habitants. Développer, dans le contexte de la géomatique, des modèles qui permettent de relier directement des caractéristiques de l'environnement construit à des champs de vents ou d'ensoleillement permet d'éclairer la décision politique. Cet article vise à mettre en évidence les relations entre le calcul de certaines variables physiques et des méthodes de géomatique, à décrire des expériences de modélisation de la physique radiative et aéraulique de la ville dans le contexte du SIG, et également à relever certains verrous scientifiques ou techniques qui subsistent dans le domaine.

**ABSTRACT.** The shape of a city, along with the layout of its streets, buildings, and green spaces, can significantly influence the flow of wind through open spaces and the amount of solar radiation received by various surfaces. Wind patterns and solar radiation directly impact urban overheating and the dispersion of pollutants, thereby affecting the quality of the urban environment and the comfort of its residents. The development of geomatics-based models that directly correlate characteristics of the built environment with wind and sunlight fields can aid in informing political decision-making. The aim of this article is to highlight the relationships between the calculation of specific physical variables and geomatics methods, to describe experiments in modeling the radiative and aerodynamic physics of urban areas within the context of GIS, and to identify some of the scientific and technical challenges that remain in this field.

**MOTS-CLÉS.** climat urbain, analyse de la forme urbaine, forme urbaine et rayonnement, forme urbaine et vent, géomatique, géoclimatique, SIG.

**KEYWORDS.** Urban climate, urban form analysis, urban form and radiation, urban form and wind, geomatics, geoclimatic studies, GIS.

### 1. Introduction

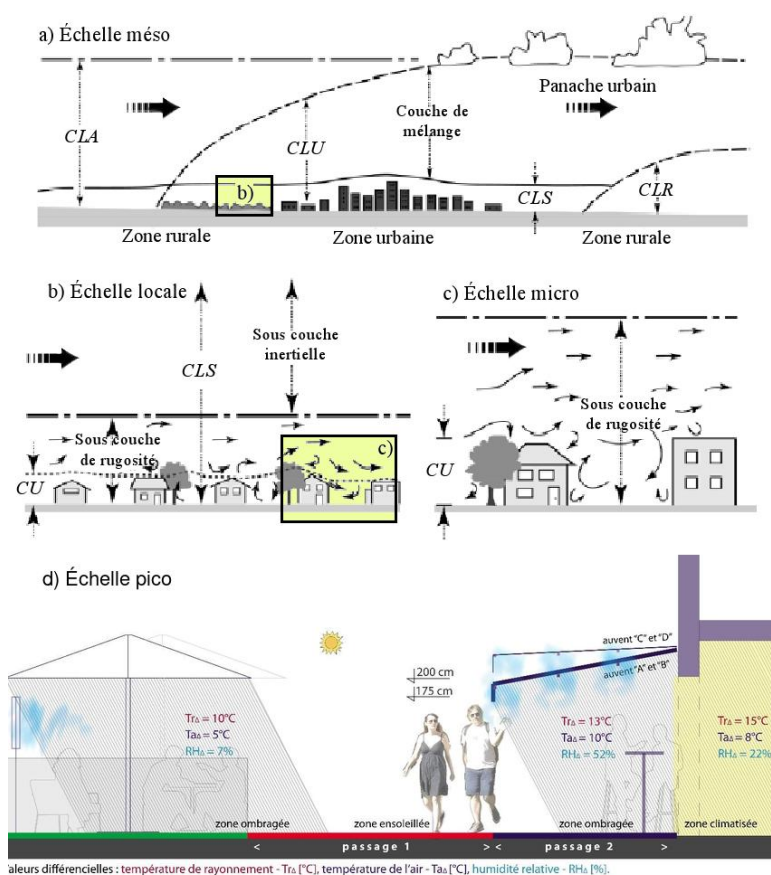
Dès les années 1970, dans un chapitre relatif aux modifications accidentelles du climat, Oke (1978) relève que l'effet des activités anthropiques sur le cycle naturel de l'eau et celui de l'énergie est multiple. Une première revue de l'impact de modifications de territoires non urbanisés, qu'elles soient accidentelles (consécutives à un incendie par exemple) ou délibérées (suite à un labour agricole notamment), lui permet de lister, à partir des potentiels effets induits, un ensemble de propriétés microclimatiques caractéristiques des milieux. Le défrichement d'espaces boisés, en plus d'altérer le cycle du carbone<sup>1</sup>, transforme celui de l'eau et, en rebond, l'humidité relative et la capacité

<sup>1</sup> L'ablation de la masse végétale des houppiers réduit de fait le pouvoir de photosynthèse des milieux qui perdent ainsi leur potentiel de « puits carbone ».

d'évapotranspiration des surfaces de sol. Cette transformation de l'état, de la nature et de la géométrie des surfaces de sol provoque aussi une modification d'albédo et conséquemment des bilans radiatifs de surface. Elle s'accompagne également d'une diminution substantielle de la rugosité de surface qui modifie l'aérodynamique des lieux.

En ce qui concerne les environnements construits tels que les territoires urbanisés, (Oke 1978) relève que la variété des configurations combinée aux dynamiques propres des « externalités » (telle que la course du soleil dans le ciel apparent ou le profil de vent notamment) induit de multiples modifications des bilans radiatifs, thermiques, hydriques et aérodynamiques des lieux. Ainsi l'insertion d'un nouveau bâtiment dans un tissu urbain est susceptible de produire, par ajout de nouveaux masques, une modification locale des tracés d'ombre et des apports solaires directs dans l'espace qui sépare les bâtiments. Elle induit aussi, par réduction du facteur de vue du ciel, une diminution des apports solaires diffus et des apports radiatifs de grandes longueurs d'onde en provenance de l'atmosphère. Elle est enfin génératrice de modifications de la circulation du vent à proximité du nouveau bâtiment (recirculations, décélération ou accélération, effets de canalisation, etc.).

Les phénomènes physiques en jeu sont connus et mis en équations, qu'ils soient de nature aéraulique, thermo-aéraulique, thermo-radiative, etc. Mais, comme le rappelle (Arnfield 2003), les transferts d'énergie et de masse dont l'équilibre est à l'origine du climat et du microclimat urbains sont complexifiés par le fait que la ville « est un patchwork de surfaces végétales, minérales et synthétiques, irriguées ou non irriguées ayant des propriétés radiatives, thermiques, aérodynamiques et hydriques » (Bouyer 2009, p. 7) spatialement différenciées et mal déterminées. C'est bien cette complexité du système-ville qui est déterminante et difficile à intégrer dans les modèles de climat urbain. Cette complexité est aussi augmentée par la multiplicité des échelles impliquées, de la couche limite atmosphérique (une échelle méso-climatique) à celle du corps humain (Siret (2018) évoque une échelle pico-climatique), en passant par la couche limite de surface à l'échelle locale et la couche de rugosité à l'échelle micro (voir figure 1).



**Figure 1.** a, b, c) trois niveaux d'échelle régulièrement utilisés pour la caractérisation du climat urbain, extrait de (Bouyer 2009, 7), adapté de (Oke 2006) ; d) effet de rafraîchissement ponctuel et momentané d'un brumisateurs, adaptation comportementale et effet climatique induits à une échelle « pico », extrait de (Popovic 2017, 241).

Si la configuration spatiale des lieux est clairement prépondérante dans l'établissement du microclimat qui lui est associé, il n'en demeure pas moins que les premières approches de modélisation du climat urbain ont rapidement opté pour le motif du canyon urbain distribué sur une grille orthogonale régulière (Oke 1978, p. 285). Cette simplification de la forme du « substrat » urbain, qui permet de réduire drastiquement la complexité<sup>2</sup> du problème au moyen d'une réduction de la dimensionnalité spatiale - la rue canyon étant assimilée à sa section transversale, s'explique relativement bien pour les tissus planifiés. Elle est *a contrario* plus difficile à justifier pour des tissus urbains irréguliers<sup>3</sup>. Ces modèles sont dits paramétriques dans le sens où ils nécessitent de caractériser des paramètres tels que la forme du canyon, éventuellement son orientation, la fraction et le type de végétation, la fraction et le type de bâtiments ou enfin la fraction de routes. Ces paramétrisations sont pertinentes lorsque l'on s'intéresse à des informations moyennes au sein d'une zone de plus de 100 m de côté. Elles n'ont donc pas vocation à estimer finement la variation spatiale de variables micro-météorologiques (comme le rayonnement solaire ou le vent) au sein d'une rue.

D'autres modèles, également basés sur la résolution des équations de la physique par les méthodes numériques, sont développés à une échelle plus résolue. Les surfaces et volumes urbains sont alors maillés afin d'appliquer des bilans d'énergie et de matière. Ces modèles utilisent donc une représentation d'un quartier plus proche de la réalité que les représentations simplificatrices des modèles paramétriques. Cependant, la complexité des équations (et notamment l'utilisation de méthodes itératives) engendre une augmentation proportionnelle de la puissance de calcul nécessaire pour les faire fonctionner. Il est donc souvent nécessaire de se cantonner à un espace et/ou une période de simulation de tailles réduites.

Face à ces approches que nous pourrions qualifier comme étant « à base physique », ont émergé, au cours des dernières décennies, des approches dites « à base spatiale ». Dans ces approches, une large partie des algorithmes sont fondés sur l'analyse de la forme et des types de sol d'un territoire. Les résultantes sont des objets géographiques avec des attributs qualitatifs (comme, par exemple, un type de zone climatique locale telle que définie par Stewart and Oke 2012) ou quantitatifs (comme, par exemple, une valeur de vitesse du vent en un point de l'espace).

De nombreuses variables micro-météorologiques sont modélisées à partir de ces approches. Cependant, certaines d'entre elles varient par interaction directe aux obstacles. C'est le cas du vent et du rayonnement qui sont directement affectés par la localisation, la taille et la forme des bâtiments, des arbres ou de tout mobilier urbain<sup>4</sup>. Les autres variables telles que la température et l'humidité de l'air ainsi que la température de surface sont considérées comme modifiées indirectement par des obstacles puisqu'elles dérivent en premier lieu du rayonnement et du vent.

Il importe de rappeler que la finalité de la modélisation conditionne le niveau de précision des attendus. Ainsi, selon que l'on s'attache à caractériser la consommation énergétique des bâtiments ou la qualité de l'air en ville dans les espaces extérieurs, l'échelle de résolution n'est pas la même. Cette « nuance » peut éventuellement avoir un fort impact sur le traitement géomatique de l'espace support (Ruas *et al.* 2025) et d'éventuelles agrégations ou désagrégations spatiales, temporelles ou thématiques.

Dans cet article, après avoir posé quelques définitions et introduit deux approches différentes pour analyser l'espace ouvert (en section 2), nous examinons le lien qui existe entre la forme urbaine et le rayonnement (en section 3), la forme urbaine et le vent (en section 4) et les différentes méthodes de modélisation et de classification qui ont été développées pour investiguer ces relations.

---

<sup>2</sup> Et probablement aussi pallier le manque de données sinon 3D du moins 2.5D des territoires.

<sup>3</sup> Les tissus urbains sont irréguliers lorsque, par exemple, l'urbanisation est spontanée ou organique, avec des tracés sinueux et étroits, un parcellaire non aligné et hétérogène, etc.

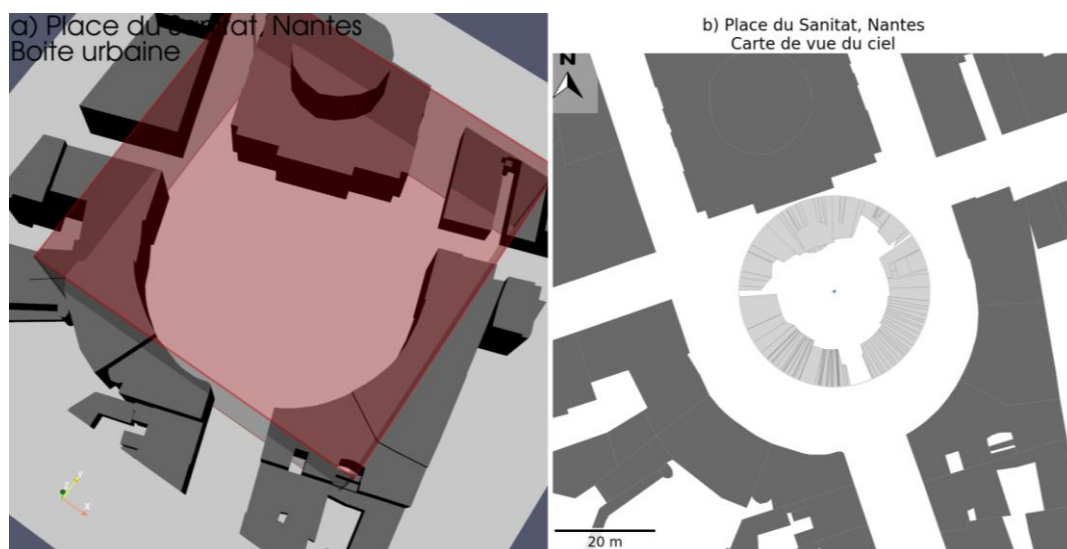
<sup>4</sup> En réalité, le vent et le rayonnement sont également impactés par les variations de température et d'humidité de l'air et de température des surfaces mais au second ordre.

## 2. Propriétés intrinsèques de la forme urbaine

L'objet de cet article est de proposer un cadre géomatique pour regrouper et asseoir un ensemble de travaux relatifs à l'analyse du climat urbain. Il vise plus précisément à comprendre les effets de l'environnement construit - en l'occurrence les bâtiments - sur la variabilité spatiale et temporelle des propriétés climatiques de l'espace ouvert, c'est-à-dire de l'espace interstitiel qui sépare les formes urbaines construites comme les bâtiments, les ouvrages de génie civil. Contrairement à celles, tangibles, d'un bâtiment, les limites d'une place ou d'une rue relèvent souvent de conventions et confèrent à l'espace ouvert urbain une nature continue. Dans cette section nous présentons successivement la notion de « boîte urbaine » et ses limites (section 2.1), puis la relation de dualité entre le bâti et l'espace ouvert (section 2.2), avant de chercher à caractériser le degré d'ouverture de la structure urbaine (section 2.3) et le principe de forme moyennée (section 2.4).

### 2.1. Limites de la boîte urbaine

Pour lever l'ambiguïté liée à cette continuité de l'espace ouvert et en faciliter l'étude, certains auteurs comme (Dupagne and Teller 1999) proposent de le diviser en un ensemble de volumes effectifs, fragments urbains assimilables à de véritables « salles à ciel ouvert » appelées « boîtes urbaines ». Dans une telle approche, l'espace interstitiel continu est localement circonscrit par un sol, un déroulé de façades et un « plafond » suspendu. Il est alors tout à fait possible de caractériser sa forme à l'aide d'indicateurs standards tels qu'un ratio d'aspect, une mesure d'élongation, un ratio de surfaces bâties, une hauteur de rugosité. Pour autant, comme le remarque Teller (2001, p. 175), considérer que l'espace ouvert est une juxtaposition d'espaces enclos, véritables boîtes urbaines, relève d'une abstraction certaine, voire d'un fort arbitraire (figure 2a). La délimitation du périmètre au sol, qui revient à découper un espace urbain en unités spatiales de référence, nous confronte par ailleurs très directement à la problématique dite du « *modifiable areal unit problem* » ou MAUP (Openshaw 1983) selon lequel la subdivision de l'espace qui vise au regroupement ou agrégation de données à des fins d'analyse est potentiellement source de biais statistique<sup>5</sup>. La délimitation du plafond suspendu est tout aussi critique lors de simulations numériques utilisant la mécanique des fluides où la hauteur de la veine numérique pourra avoir des répercussions sur les processus à modéliser et également sur les résultats de la simulation.



**Figure 2.** De la boîte urbaine (à gauche, place du Sanitat à Nantes), à la carte de vue du ciel (associée à un point de la place du Sanitat à Nantes). ©T. Leduc / AAU-CRENAU.

<sup>5</sup> Dans un registre très différent, le *gerrymandering*, comme découpage électoral partisan, est un exemple de MAUP. Il s'agit d'une manipulation volontaire des circonscriptions électorales afin de diluer certains votes (action de cracking) et d'en regrouper d'autres (action de packing).

## 2.2. Approche plenum vs. approche atomiste

Le terrain d'étude ayant été délimité, la relation du « vide » interstitiel au « plein » des bâtiments, et les formes de continuité qu'elle produit, perdurent. Pour tenter de lever cette difficulté, Teller (2001, p. 179) fait le constat que « l'espace ouvert partage une relation de stricte dualité avec la forme bâtie qui l'entoure ». Cette dualité se traduit d'un point de vue ontologique par une opposition entre une approche *atomiste* et une approche *plenum* de l'espace urbain (Couclelis 1992). Dans le premier cas, ce dernier est considéré comme une juxtaposition d'entités spatiales matérielles (le bâti en l'occurrence), bien circonscrites (Ruas, Pham, and Pinson (2019) évoquent des « entités continuantes et bien définies ou *bona fide* ») et relativement immuables. Dans le second cas, comme l'écrit Sarradin (2004, p. 58), « l'espace n'existe pas *a priori* ». Il est le produit de contraintes qui lui sont extérieures, il « résulte d'une combinaison singulière de toute une série de facteurs, comme les axes dominants, la répartition des masses construites, etc. ». Dans ce registre ontologique, l'espace urbain est assimilé à un champ continu de propriétés susceptibles de se transformer par injection ou suppression de volumes construits par exemple, on parle aussi à ce propos d'approche orientée champ<sup>6</sup>. Cette malléabilité de conception permet de s'affranchir de la matérialité ou non de l'espace d'étude, de caractériser chaque position de l'espace indépendamment de son voisinage et, enfin, de s'affranchir des délimitations ou d'en autoriser les chevauchements. Produire et analyser un champ scalaire thermométrique ou barométrique ou un champ vectoriel anémométrique relève de l'ontologie *plenum* qui est l'approche la plus couramment mise en œuvre dans l'étude climatique de l'espace ouvert.

Dans une approche *atomiste* de l'analyse bioclimatique de la ville, les bâtiments de l'environnement construit sont considérés comme des obstacles susceptibles, par effets induits, de générer des zones de recirculation, de ralentissement et d'accélération du vent. Les nouvelles entités géométriques ainsi dessinées sont alors directement rattachables aux bâtiments dont elles dérivent<sup>7</sup>. *A contrario*, dans le cadre de l'approche *plenum*, l'espace interstitiel devient l'objet principal et le bâti qui l'entourne n'est plus qu'un « générateur d'effets ». Plus précisément, dans l'approche *plenum*, chaque point de l'espace interstitiel est considéré pour lui-même. Dans un problème de mécanique des fluides, l'approche *plenum* est couramment utilisée. Dans ce cas, un point de l'espace n'est pas directement associé à un obstacle mais aux volumes d'air qui lui sont adjacents, auxquels il est lié par un système d'équations de mécanique des fluides. Même s'il est contraint par les obstacles, c'est bien le vide qui est ici caractérisé.

L'approche par le *plenum* invite à une forme de renouvellement de nos cadres habituels de pensée. Il ne s'agit plus d'analyser les « pleins » (il faut comprendre ici l'environnement bâti pour lui-même), mais l'effet induit par ces « pleins » sur le « vide » (l'espace ouvert) qui s'intercale (figure 2b). Chaque position de l'espace ouvert devient alors « capteur » des propriétés de son environnement immédiat (voiture ou non et dans quelle proportion la voûte de ciel, quelle est sa distance au front bâti, etc.), et « traceur » de l'évolution de ces mêmes propriétés dans la durée (l'énergie accumulée par la surface de sol ou de façade support de la position ponctuelle sera d'autant plus importante qu'elle aura été exposée durablement à l'irradiation par exemple).

Si l'approche par le *plenum* de l'espace ouvert est séduisante, il n'en demeure pas moins qu'elle pose d'autres problèmes relatifs notamment à l'échantillonnage spatial de l'espace ouvert et à la singularité des points de vue associés. Où doit-on placer les « capteurs-traceurs » pour qu'ils soient raisonnablement représentatifs des propriétés de l'espace ouvert dans toutes leurs dimensions (la discrétisation de l'espace doit rendre compte de son hétérogénéité éventuelle tout en ménageant un volume de données et des temps de calcul acceptables) ? Comment représenter la forme des masques et les propriétés de

---

<sup>6</sup> La communauté des géographes évoque à ce propos des approches maillées (ou *raster*), par opposition aux approches vectorielles.

<sup>7</sup> Ce registre ontologique est repris dans la suite de cet article dans le cadre notamment de la « Classification des écoulements par la forme urbaine ».



l'environnement en tout point de l'espace<sup>8</sup> au cours du temps et de l'évolution du phénomène étudié (il faut pouvoir modéliser une dynamique 3D+t en chaque point d'échantillonnage tout en ménageant un volume de données et des temps de calcul acceptables).

### 2.3. Ouvertures et vues du ciel

Quantifier, par la mesure ou la simulation, le degré d'ouverture au ciel de la structure urbaine est une préoccupation majeure pour l'analyse ou le *design* climatique des villes. Réguler cette ouverture permet de contrôler le rayonnement diffus à des fins d'éclairage naturel ou pour des motivations énergétiques. Ainsi, comme le relève Malys (2012, p. 23), cette ouverture conditionne « l'importance du phénomène de rafraîchissement radiatif vers le ciel, dont la température de rayonnement est généralement plus faible que celle des surfaces urbaines, particulièrement la nuit ».

Pour quantifier ce degré d'ouverture appelé facteur de vue du ciel<sup>9</sup> (ou *SkyView Factor*, SVF en anglais), Oke (1981) a proposé des approximations à base trigonométrique. Avec la généralisation des modèles numériques de terrain et de surface, des méthodes de calcul du SVF à base *raster* ont été développées (Ratti, Baker, and Steemers 2005). De la même manière, avec l'avènement des bases de données topographiques 2.5D, des approches vectorielles permettant de le calculer ont vu le jour (Compagnon 2004). Enfin, pour pallier l'absence de données, d'autres auteurs ont proposé des solutions par segmentation des pixels de ciel sur des photographies hémisphériques (Grimmond *et al.* 2001). Plus récemment, des méthodes exploitant les corpus de la *Street View Imagery* et des techniques de segmentation d'image à base notamment d'apprentissage profond ont vu le jour (Middel *et al.* 2018).

Caractériser l'ouverture au ciel de la structure urbaine consiste à quantifier la vue du ciel depuis l'ouvert urbain et revient donc à résoudre un problème d'accessibilité visuelle pour reprendre les termes de (Groleau 2000). Or, dans le registre de l'analyse des visibilité, l'approche *plenum* de l'ouvert urbain a donné lieu à l'émergence d'un grand nombre d'outils méthodologiques, de l'*isovist*<sup>10</sup> (Benedikt 1979) à la *space syntax*<sup>11</sup> (Hillier and Hanson 1984) en passant notamment par les s- et e-partitionnement de l'espace ouvert<sup>12</sup> (Peponis *et al.* 1997). Ces trois approches ont pour limite de ne pas capturer la tridimensionnalité de l'espace environnant et la dynamique d'une course solaire dans le ciel apparent associé à une position donnée. C'est la raison pour laquelle nous retenons le mécanisme de projection sphérique proposé notamment par Teller and Azar (2001) qui est une adaptation (au sens de la simulation

---

<sup>8</sup> Même si l'espace n'est pas un continuum « lisse », infiniment divisible, mais une juxtaposition granuleuse de quanta (le quantum étant une limite physique de l'observabilité ou plus petite unité discrète d'espace physiquement), la longueur de Planck - qui s'établit approximativement à  $1,616 \cdot 10^{-35}$  mètre - rend en pratique illusoire l'idée de représenter tous les points de l'espace.

<sup>9</sup> Le SVF est une mesure de la quantité de ciel qui peut être observée à partir d'une position donnée.

<sup>10</sup> Un isovist est une forme géométrique constituée de l'ensemble des points de l'espace visibles (dans toutes les directions possibles du plan ou de l'espace d'étude) depuis un point donné appelé point de vue ou point de génération. Si aucune arête ou surface opaque n'arrête la portée du champ de vision, il peut être nécessaire d'imposer un horizon artificiel pour en limiter la portée.

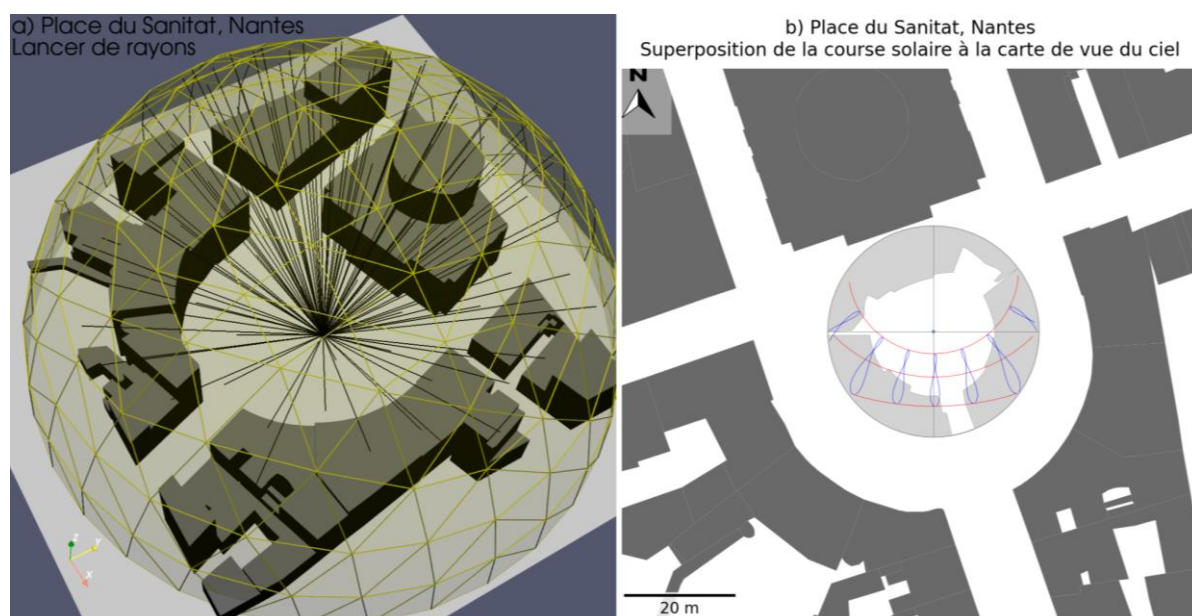
<sup>11</sup> La *space syntax* ou syntaxe spatiale est une proposition théorique et pratique qui vise notamment à l'analyse des espaces ouverts par l'usage de lignes axiales d'une part et d'espaces convexes d'autre part. La représentation d'un fragment urbain en carte axiale permet alors, par exemple, de développer un ensemble d'indicateurs qui servent à établir des corrélations avec des phénomènes sociaux mesurables.

<sup>12</sup> Les techniques de s- et e-partitionnement proposées par Peponis *et al.* (1997) visent à subdiviser l'ouvert urbain en sous-ensembles convexes présentant, pour chacun, une information visuelle stable. Un observateur qui se déplacerait dans un tel sous-ensemble ne serait ainsi exposé à aucune rupture ou changement « discret » dans son environnement visuel. Un tel changement consiste par exemple en l'apparition ou la disparition d'éléments de l'espace facilement identifiables comme des murs.

à base vectorielle) de la méthode par segmentation des pixels de ciel de photographies hémisphériques que nous avons déjà évoquée<sup>13</sup>.

Ce mécanisme à base de projection sphérique consiste, en première approximation, à placer un « capteur virtuel panoptique » (à la façon d'une caméra 360°) en chacune des positions issues de l'échantillonnage de l'espace ouvert. L'espace d'étude n'est alors pas analysé comme en surplomb, en vue du dessus, mais à partir d'un ensemble de points de vue immergés dans l'ouvert urbain. Singulariser ainsi chaque position de l'espace interstitiel permet de distinguer le fragment urbain immédiatement environnant tel que vu et vécu à hauteur de piéton par exemple. Il s'agit alors de détourner chacun des obstacles susceptibles d'occulter le champ de vision du capteur 360 et de les superposer à la voûte de ciel pour mesurer leur éventuel effet de masque.

Avec le mécanisme de projection sphérique de Teller and Azar (2001), et sous réserve d'opter pour une projection isoaire<sup>14</sup>, le facteur de vue du ciel se calcule par simple ratio de surfaces dans le plan de projection<sup>15</sup>. Toutefois, estimer le facteur de vue du ciel associé à une position donnée est un cas particulier de calcul de facteur de forme entre cette même position et l'ensemble de la voûte céleste - que l'on représente généralement sous la forme d'un hémisphère centré au point de vue et de rayon infini. À ce titre, il est tout à fait possible, pour le calculer, d'utiliser des méthodes issues des radiosités stochastiques comme un lancer de rayons (figure 3a) avec une méthode d'intégration type Monte Carlo, ou déterministes comme la sphère unitaire de Nusselt ou la méthode ISA (*Infinitesimal surface approximation*). Elles sont cependant exigeantes en termes de temps de calcul et restent, à ce titre, assez peu mises en œuvre à l'échelle d'un quartier ou d'une commune (Caliot *et al.* 2023).



**Figure 3.** Calcul du SVF par discrétisation de la voûte de ciel et lancer de rayons (à gauche), superposition de la projection sphérique des trajectoires solaires à la projection sphérique des masques du bâti environnant (à droite). On notera que le SVF peut aussi se calculer au moyen d'un rapport de surfaces dans une projection sphérique isoaire. ©T. Leduc / AAU-CRENAU.

<sup>13</sup> Les solutions par segmentation de Grimmond *et al.* (2001) exploitent un appareil photographique avec un objectif *fish-eye* pour projeter des vues du ciel hémisphériques sur un plan. Le mécanisme de double projection mis en œuvre par Teller and Azar (2001), qui rabat les masques environnants sur un hémisphère unitaire avant de les projeter dans un plan horizontal au moyen d'une projection sphérique, en est une retranscription à l'aide d'objets géographiques 3D.

<sup>14</sup> On parle aussi de projection cartographique équivalente ou de transformation géométrique équisurfacique.

<sup>15</sup> Le facteur de vue du ciel (SVF) est alors le ratio de la surface de ciel (c'est-à-dire de la surface qui n'est pas recouverte par les masques environnants) rapportée à la surface du disque de projection.

## 2.4. À propos de la forme moyennée

À rebours de ces méthodes à base de calculs intensifs, il existe des alternatives qui visent à décrire, de manière plus agrégée, les grandes caractéristiques de la forme urbaine et de son ouverture. Pour cela, des motifs de ville peuvent notamment être utilisés (comme celui de la rue canyon par exemple) mais également des paramètres descriptifs (on parle aussi d'*urban canopy parameters*) comme un ratio d'aspect, une hauteur de rugosité, etc.

## 3. Forme des tissus et course solaire

Il est possible d'étendre l'approche qui consiste à caractériser la part de masques bâtis sur fond de ciel en chacun des points de l'ouvert urbain, à l'étude de phénomènes ayant une dynamique propre. Les propriétés intrinsèques du tissu urbain concerné entrent alors en interaction avec celles des phénomènes étudiés. Il s'agit alors de détourner chacun des obstacles susceptibles d'occulter le champ de vision du capteur virtuel 360 et de tracer, sur (ou sous) ce « décor » quasi immuable<sup>16</sup>, les dynamiques des phénomènes étudiés en respectant les différents plans pour éliminer les parties en arrière-plan cachées par un avant-plan. À l'ombre d'un déroulé de façades, une caméra 360 ne capte ainsi qu'une petite partie - éventuellement très fractionnée - de la course du soleil dans son ciel apparent. Vu du capteur virtuel installé dans l'ouvert urbain, le front bâti est un avant-plan susceptible d'intercepter tout rayon issu d'un soleil en arrière-plan (dans le registre des études urbaines, le soleil est généralement assimilé à un point infiniment distant). Dans cette section, nous passons d'une information binaire (telle position au sol est soit à l'ombre, soit au soleil) à une information continue (telle position reçoit tel rayonnement en Watt-heure par mètre carré de surface), en présentant successivement la notion de tracé d'ombre (section 3.1), puis celle de bilan radiatif (section 3.2).

### 3.1. Des ouvertures et vues du ciel au tracé d'ombre

S'il importe de caractériser la vue du ciel pour ses apports radiatifs diffus, il n'en demeure pas moins déterminant de distinguer les portions de ville situées à l'ombre ou au soleil à une date et une heure donnée pour quantifier les apports solaires directs. Or, pour une position et une date donnée, être au soleil ou être à l'ombre revient à savoir si, depuis cette même position, on est ou non en mesure de voir le soleil... ce qui relève d'une évaluation d'inter-visibilité. Deux familles de méthodes permettant de modéliser les apports solaires par ciel clair s'offrent alors à nous.

La première méthode renverse le point de vue que nous avons développé jusqu'à présent. Elle réunit les capteurs virtuels en un unique dispositif qu'elle déporte à l'infini, en lieu et place du soleil. Ce renversement de point de vue installe de fait le soleil en position d'observateur de la scène. Toute portion de la scène urbaine qui n'est pas vue depuis le soleil est alors dans l'ombre et, *a contrario*, ce qui y est ensoleillé est en vue directe. Comme cet observateur est à l'infini « la projection à réaliser est une axonométrie dont le vecteur de projection est la direction du rayon solaire à l'instant et au lieu considéré (ceci correspond à une projection héliodon) » (Groleau 2000). On obtient ainsi une collection de polygones d'ombre, associés à un instant donné, pour les différents masques de la scène urbaine. En répétant cette projection héliodon à divers moments d'une même journée par exemple, et en identifiant par des opérations géométriques les zones de recouvrement multiples, il est possible notamment de dégager les zones à l'ombre à des heures spécifiques de la journée ou de calculer leurs durées d'ensoleillement (figure 4a).

Si cette première méthode, appelée aussi approche héliodon, présente l'avantage de dessiner des traits d'ombre qui ne sont pas crénelés par un échantillonnage préalable de l'espace, il peut néanmoins être plus immédiat de traiter de l'exposition solaire de l'ouvert urbain au moyen d'une collection de capteurs

---

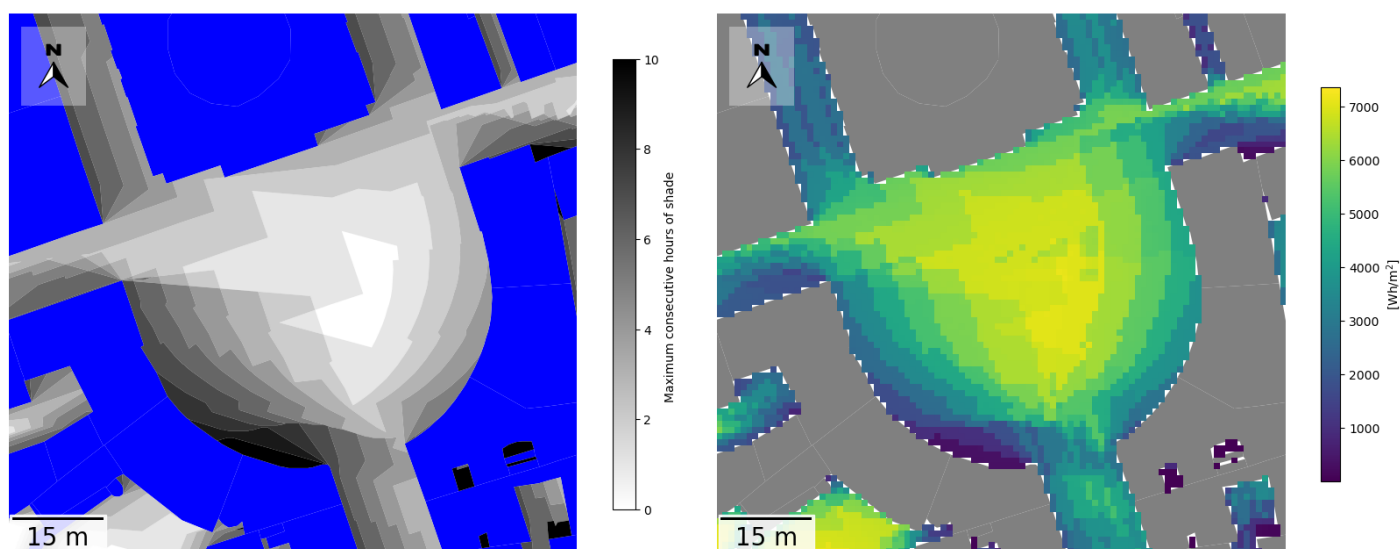
<sup>16</sup> Les cinématiques d'un piéton qui se déplace dans le champ de vision du capteur, ou du soleil dans le ciel apparent de ce même capteur ont des fréquences d'actualisation bien supérieures à celle d'un fragment urbain qui ne se renouvelle que très occasionnellement.



virtuels comme nous l'avons déjà évoqué. La deuxième méthode propose alors d'échantillonner l'espace d'étude afin de pouvoir étudier la covisibilité du soleil en chacun des capteurs virtuels issus de la discrétisation, à chaque pas de temps. Le temps d'un tel calcul est fonction tant du nombre de capteurs que du nombre de positions différentes considérées pour le soleil dans le ciel.

La force de la proposition faite notamment par Teller and Azar (2001) réside dans sa capacité à dissocier les propriétés intrinsèques relatives aux formes du fragment urbain d'une part des propriétés des phénomènes étudiés d'autre part. Sous réserve d'être bien comprise, cette séparation offre alors la possibilité de distinguer l'analyse des propriétés intrinsèques de l'urbain dans un pré-traitement dédié (ce qui est indépendant du temps<sup>17</sup>) de celle des propriétés du phénomène étudié (ce qui dépend du temps<sup>18</sup>), comme présenté en figure 3b. On construit ainsi, pour chaque capteur et au moyen d'une projection sphérique, une représentation dans un plan horizontal des masques bâtis<sup>19</sup>. Cette représentation étant réalisée une unique fois, il reste alors à déterminer si la projection sphérique de l'ensemble des positions occupées par le soleil dans le ciel apparent est masquée ou non masquée ce qui revient à un simple test géométrique dans le plan de projection (test d'appartenance ou non d'un point à un polygone).

## 21 June, from 9am to 6pm (UTC)



**Figure 4.** (à gauche) dans une approche atomiste — appelée aussi parfois héliodon — les tracés d'ombre sont géométriquement « exacts » pour un pas de temps donné. Il est possible de dériver des heures d'ombrage cumulé par superposition d'information binaire (à l'ombre ou au soleil) ; (à droite) dans une approche plenum ou maillée on peut réaliser un bilan radiatif simplifié en tout point issu de l'échantillonnage de la surface de sol de la place du Sanitat à Nantes. Contrairement aux tracés de l'approche atomiste, cet échantillonnage préalable provoque un effet de crénelage au rendu. ©T. Leduc / AAU-CRENAU.

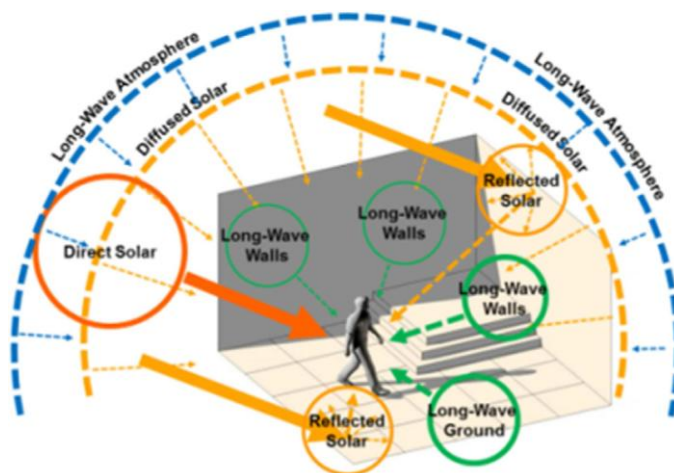
<sup>17</sup> Il est ainsi possible de précalculer, en tout point de l'espace ouvert urbain et indépendamment de la position du soleil dans le ciel apparent associé, différents facteurs de vue (du ciel, des murs, de la végétation, etc.) ainsi que la carte de vue du ciel.

<sup>18</sup> A l'échelle d'une commune ou d'une agglomération, les positions du soleil pour un ensemble de dates et d'heures spécifiques sont partagées par l'ensemble des capteurs. Il suffit donc de calculer une et une seule fois les projections sphériques de ces positions solaires (à partir de l'un des capteurs) puis de translater les résultats de ces projections à destination de chacun des autres capteurs.

<sup>19</sup> Pour ce faire, il faut d'abord dériver des emprises de bâtiments et attributs de hauteur associés de la BD TOPO®, une collection de prismes droits. Les façades verticales de ces volumes forment alors un ensemble de masques qu'il faut traiter au moyen d'un mécanisme de double projection évoqué par Teller and Azar (2001).

### 3.2. Du tracé d'ombre au bilan radiatif

Comme nous venons de le constater, diverses méthodes peuvent être mises en œuvre, dans le contexte de la géomatique, pour calculer en tout point de l'espace ouvert urbain, la proportion de ciel vu d'une part (SVF), et la propriété d'être ou non dans l'ombre à une date donnée. Or, pour établir le bilan des flux radiatifs reçus en différents points d'une scène urbaine (figure 4b), il importe d'estimer la fraction d'énergie reçue du ciel et celle reçue du soleil, en plus de la part réfléchie ou émise (dans le spectre des grandes longueurs d'onde) par les autres surfaces en regard (figure 5). Si la quantification des parts d'énergie reçue du ciel et du soleil est relativement bien maîtrisée dans le contexte des outils de la géomatique, le calcul des multi-réflexions et émissions d'énergie entre surfaces en regard reste un objet d'enjeu à plusieurs titres.



**Figure 5.** Schéma des flux radiatifs à l'échelle du piéton, extrait de (Huang, Cedeño-Laurent, and Spengler 2014).

En effet, premièrement il faut une connaissance fine des propriétés de surface (albédo, émissivité, caractère lambertien ou non de la surface, etc.) de chacun des éléments de la scène. Or, les données topographiques requises pour établir un tel bilan sont lacunaires<sup>20</sup>. Deuxièmement, il s'agit de coupler les calculs radiatifs à des modèles qui permettent de simuler les flux de chaleur échangée par la surface (conduction, convection et éventuellement évaporation). D'ailleurs, à propos de la « température radiante moyenne [qui] est une température qui permet de globaliser les échanges thermiques par rayonnement entre un individu et son environnement », (Grosdemouge 2020, pp. 82–83) relève qu'elle « est une variable physique difficilement caractérisable en extérieur, aussi bien en termes de mesure que de modélisation ». En dépit de toutes ces réserves, un modèle tel que SOLWEIG (Lindberg *et al.* 2008) peut être utilisé dans le contexte d'UMEP (Lindberg *et al.* 2018) pour produire, dans le contexte d'un SIG, des indicateurs agrégeant les flux de courtes et grandes longueurs d'onde tels qu'une température moyenne radiante ou un indice de confort thermique comme l'UTCI (Li 2021). À noter que dans ce cas, les flux sont calculés à partir d'hypothèses simplificatrices concernant la température de surface, aucun bilan complet n'étant réalisé sur l'ensemble des surfaces de la scène urbaine.

### 3.3. Discussion

Dans cette section, nous avons présenté un ensemble de concepts et outils permettant d'analyser la forme de la ville au regard, par exemple, de son exposition à la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface. Cette revue a permis de constater que les méthodes et outils de la géomatique sont parfaitement adaptés pour étudier la diversité de configurations, d'ouvertures et d'orientations des tissus urbains, mais aussi la complexité intrinsèque - qu'il s'agisse du rapport au temps ou à la

<sup>20</sup> La Base de Données Nationale des Bâtiments (BDNB) répertorie un ensemble d'informations pour chacun des 20 millions de bâtiments, résidentiels ou tertiaires, de la France métropolitaine qui pourraient utilement être exploités.

tridimensionnalité de l'espace - des phénomènes physiques représentés. Dans la section à suivre, nous montrons que certaines notions déjà introduites peuvent être reprises pour caractériser, dans le contexte de la géomatique, un phénomène aussi complexe que la circulation du vent en ville.

## 4. Des ouvertures et vues du ciel à la circulation du vent en ville

Dans un modèle climatique à base physique, le champ de vitesse et son évolution au cours du temps sont indispensables pour estimer correctement les flux d'énergie et de matière qui ont lieu entre les surfaces urbaines et l'atmosphère. Or, la taille et l'organisation des obstacles (relief, bâtiments, végétation mais aussi tout autre mobilier urbain) modifient ces champs de vitesse localement et donc l'ensemble des flux d'énergie qui en découlent. La caractérisation des formes urbaines est depuis longtemps utilisée pour expliquer les variations spatiales de la vitesse du vent, que ce soit à l'échelle d'une ville ou d'un quartier. Bien que la modélisation du vent soit plus couramment réalisée dans des outils de mécanique des fluides numériques (CFD) qui manipulent des matrices représentatives de voxels ne contenant que peu (voire pas) d'information spatiale, les SIG sont donc particulièrement appropriés pour appréhender les phénomènes de vent. C'est ce lien entre vent et géomatique qui est illustré dans cette section.

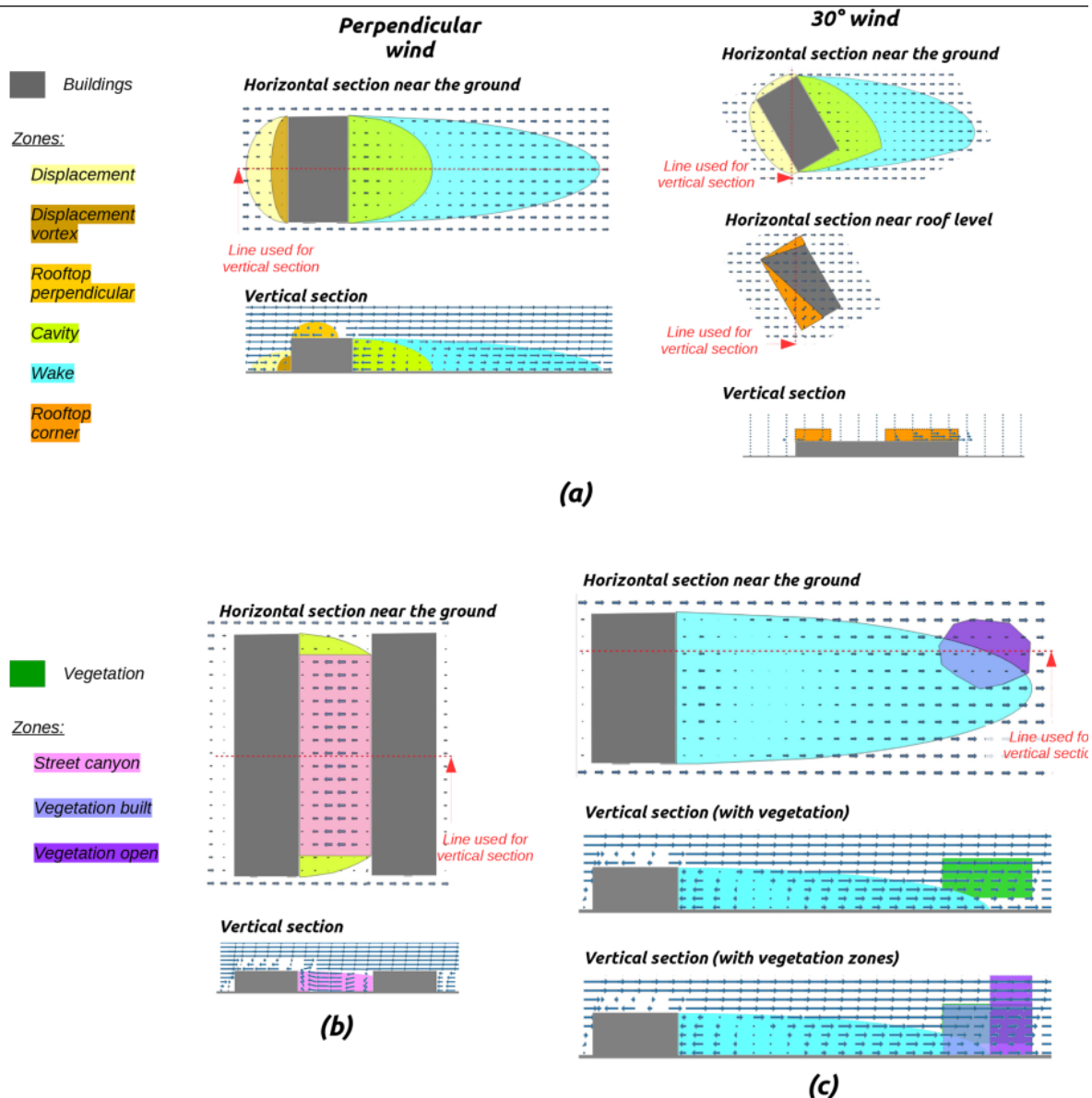
### 4.1. Classification des écoulements par la forme urbaine

#### 4.1.1. Lorsque la forme est moyennée

Certaines méthodes ne visent pas à évaluer le vent de manière absolue mais plutôt à identifier des zones d'une ville qui auraient un caractère aéraulique particulier du fait de leur forme urbaine locale. C'est par exemple le cas de la classification proposée par He, Ding, and Prasad (2019) qui décrit la ville de Sydney à partir de 20 types de tissus urbains ayant des caractéristiques aérauliques propres. Pour cela, ils s'inspirent du concept de *Local Climate Zones* telles que définies par Stewart and Oke (2012) qui tient compte de la compacité du bâti et de sa hauteur, concept auquel ils ajoutent des indicateurs décrivant principalement l'organisation des rues (inspiré du travail de Southworth and Ben-Joseph (2013)). D'autres méthodes caractérisent le potentiel de ventilation de chacun des quartiers d'une agglomération également à partir de paramètres morphologiques mais ils vont plus loin en utilisant cette information de potentiel pour identifier des couloirs de ventilation privilégiés à l'échelle de l'agglomération (Gál and Unger 2009 ; Hsieh and Huang 2016 ; W. Wang *et al.* 2022). Pour déterminer les principaux couloirs de ventilation, Hsieh and Huang (2016) caractérisent le potentiel de ventilation de chacun des pixels de leur zone d'étude puis utilisent des algorithmes de plus court chemin en pondérant le graphe de rues par l'indicateur de potentiel de ventilation.

#### 4.1.2. Lorsque chaque obstacle est considéré

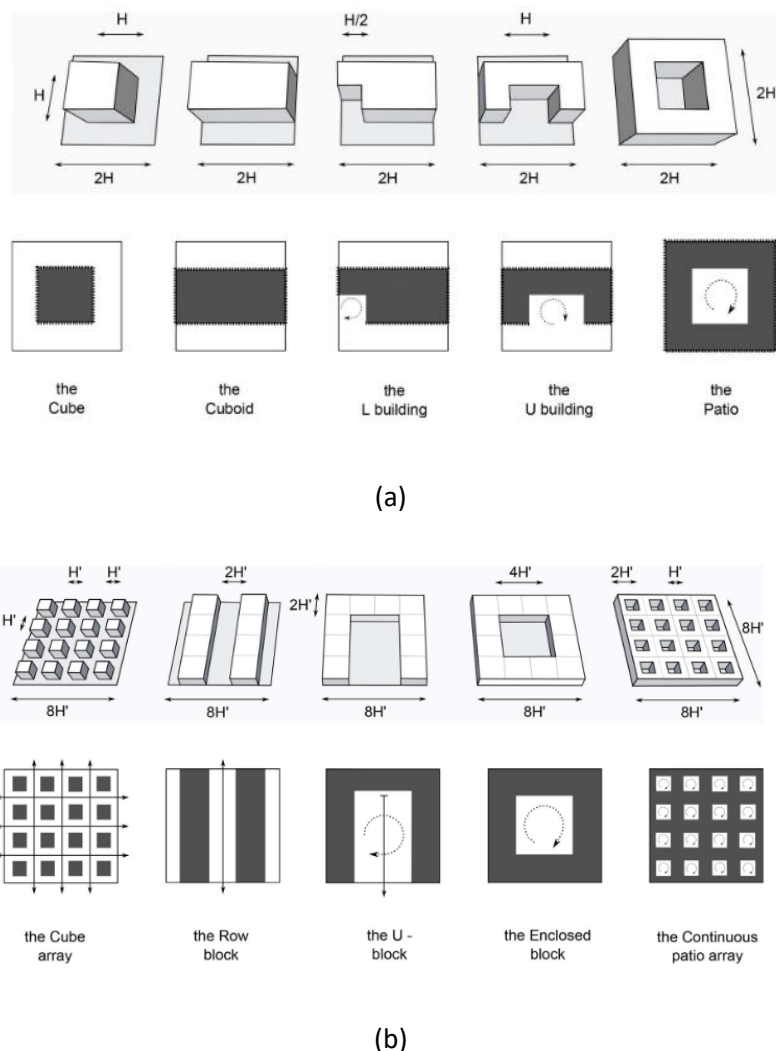
Un bâtiment que l'on considère suffisamment loin d'autres obstacles influence le comportement du vent autour de lui. Cependant, l'impact n'est pas identique selon que l'on s'intéresse au volume d'air situé en amont du bâtiment, sur ses côtés, en aval ou à l'aplomb. Chacune de ces zones a une taille et un comportement qui lui sont propres en fonction du gabarit et de la forme du bâtiment. De même, introduire un deuxième bâtiment à proximité du premier peut, dans certaines circonstances définies par la distance entre les bâtiments et leurs tailles respectives, créer des zones au comportement aéraulique particulier. La figure 6 présente de manière simplifiée la plupart de ces zones et les particularités de leur comportement, et ce pour une direction de vent donnée (zone considérée comme indépendante de l'intensité).



**Figure 6.** Illustration des neuf zones pour lesquelles un comportement particulier du vent a pu être observé : (a) pour un bâtiment isolé, (b) lorsque deux bâtiments sont proches et (c) pour la végétation proche ou non d'un bâtiment. Source : Bernard, Lindberg, and Oswald (2023).

Dans cette figure, les zones grises correspondent à une forme de bâtiment relativement simple. La réalité est plus complexe puisqu'il existe une grande variété de formes de bâtiments. Merlier *et al.* (2018) proposent une classification des principales formes rencontrées (figure 7a). Comme il existe également une infinité d'organisation de bâtiments les uns par rapport aux autres, ils proposent également de réduire cette combinatoire à cinq types de blocs urbains (figure 7b). À chacune de ces formes de bâtiments ou structure de quartiers est alors associé un type de comportement aéraulique.





**Figure 7.** Typologie de (a) bâtiments et de (b) blocs. Source : Merlier et al. (2018).

Ces travaux permettent d'attribuer facilement à un bloc des informations sur l'écoulement potentiel qui peut s'y produire. Cependant, comme pour toute approche qualitative, elle a ses limites lorsqu'elle est appliquée à des tissus urbains réels qui sont autrement plus complexes.

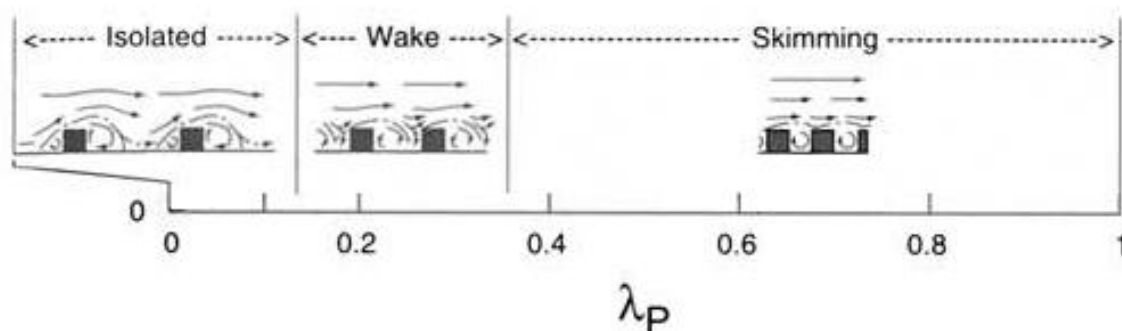
## 4.2. Quantification des écoulements dérivée de l'analyse de la forme urbaine

### 4.2.1. Lorsque la forme est moyennée

Classiquement, pour décrire l'écoulement de l'air au sein d'une agglomération, des modèles atmosphériques qui résolvent les équations de Navier-Stokes sont utilisés. À cette échelle, les modèles sont dits paramétriques, c'est-à-dire que chacun des obstacles au vent ne peut être considéré séparément. Les bilans d'énergie et de matière sont réalisés à l'échelle d'un pixel de plusieurs dizaines de mètres de côté. De fait, un seul profil vertical de vent est attribué à ce pixel. L'analyse de la rugosité de la surface<sup>21</sup> permet d'établir des lois empiriques entre des indicateurs qui caractérisent cette rugosité et les coefficients de traînée des obstacles au vent. Lors de simulations du vent à l'échelle d'une agglomération, les coefficients qui résultent de ces lois sont ensuite utilisés comme paramètres caractérisant la rugosité de chaque maille du domaine, paramètres qui vont affecter les équations qui gouvernent l'écoulement de l'air. La rugosité générée par les obstacles peut être définie de différentes manières et utilisée pour affecter l'écoulement à un seul ou à plusieurs niveaux du modèle atmosphérique. Le calcul des forces de traînées qui vont être ajoutées aux équations est souvent réalisé à partir du modèle de Belcher, Jerram,

<sup>21</sup> La rugosité caractérise les variations de hauteur des surfaces urbaines en contact avec l'atmosphère.

and Hunt (2003) qui tient compte de la densité frontale d'obstacle dans un volume<sup>22</sup>, du volume de ville non occupé par des bâtiments et de la hauteur « typique » des bâtiments. Cette équation implique une relation linéaire entre les forces de traînées<sup>23</sup> et la densité frontale d'obstacles. Or, l'écoulement est largement impacté par la taille et l'organisation des obstacles dans l'espace. En premier ordre, dans le cas d'une rue canyon, trois types d'écoulement peuvent être distingués en fonction de la fraction de bâtiments (cf. figure 8) mais également de la densité frontale de bâtiments (Grimmond and Oke (1999) - non montré ici).



**Figure 8.** Les trois types d'écoulement de l'air selon la fraction de bâtiments.  
Source : adapté de Grimmond and Oke (1999).

Pour tenir compte de la diversité de ces écoulements en fonction de la densité frontale, plusieurs solutions existent :

- Santiago and Martilli (2010) ont proposé d'ajouter des facteurs multiplicatifs établis empiriquement à l'équation des coefficients de traînée, facteurs multiplicatifs qui diffèrent selon la fourchette de valeur de densité frontale dans laquelle le pixel de ville se trouve.
- Lu *et al.* (2023) ont établi des modèles non linéaires entre le coefficient de traînée et la densité frontale.
- Nagel *et al.* (2023) ont classé des tissus urbains en Zones Climatiques Locales et ont attribué à chacun d'eux un coefficient de traînée qui lui est propre.

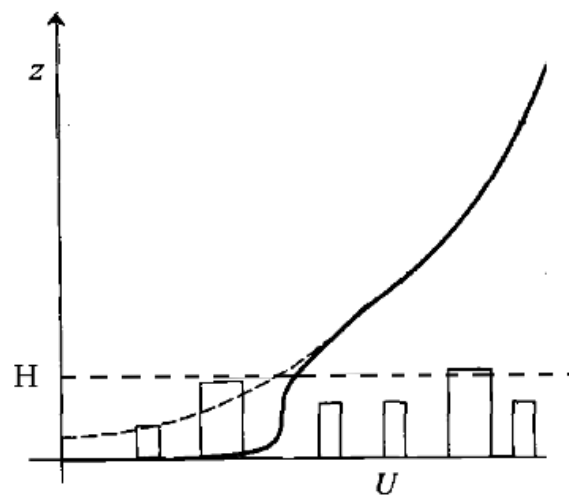
À noter que depuis plusieurs années, les modèles atmosphériques intègrent l'effet de la hauteur des bâtiments sur les forces de traînées à plusieurs niveaux de l'atmosphère (Santiago and Martilli 2010 ; Schoetter *et al.* 2020). Il est donc maintenant nécessaire de calculer les coefficients de traînées (et donc les densités frontales d'obstacles) à plusieurs niveaux (par exemple 0-5 m, puis 5-10 m, etc.).

En dehors des modèles qui permettent de simuler dynamiquement un champ de vent sur une large étendue, il existe également des équations qui permettent d'estimer un profil vertical du vent moyen d'une zone en fonction de paramètres morphologiques. Plusieurs équations ont été proposées, les deux plus connues étant probablement :

- la loi de puissance : la vitesse augmente selon une loi de hauteur à la puissance  $p$ ,
- le profil urbain (figure 9) : il est divisé en deux par la limite de canopée urbaine, définie comme la moyenne géométrique de la hauteur de bâtiment  $H$  de la zone (Macdonald 2000) :
  - en-dessous, la vitesse augmente avec l'exponentielle de la hauteur,
  - au-dessus, la vitesse augmente avec le logarithme de la hauteur.

<sup>22</sup> Définie comme le ratio des surfaces de façades projetées dans un plan perpendiculaire à la direction du vent et l'aire de la zone considérée dans l'analyse.

<sup>23</sup> Forces exercées par les bâtiments sur l'air dans la direction de l'écoulement mais de sens opposé.



**Figure 9.** Profil vertical de vent défini comme exponentiel sous la canopée et comme logarithmique au-dessus. Source : adapté de Hanna and Britter (2002)

Ces équations font intervenir des paramètres (tels que le paramètre  $p$  de la loi de puissance) qui tiennent compte des caractéristiques morphologiques propres à la zone. Comme précédemment, les paramètres les plus fréquemment utilisés sont la densité frontale de bâtiments (définie précédemment) et la fraction de bâtiment. D'autres indicateurs, tels que la longueur de déplacement ou la longueur de rugosité<sup>24</sup> sont également nécessaires, mais ils sont eux aussi directement dépendants de la densité frontale de bâtiments et de la moyenne géométrique des hauteurs des bâtiments de la zone. Cependant, ces profils ont principalement été établis pour des formes urbaines académiques, où l'organisation et la forme des bâtiments sont régulières et isotropes<sup>25</sup>. Or, pour des formes plus complexes, plusieurs études montrent que les paramètres morphologiques actuellement utilisés ne sont pas suffisants pour expliquer la variabilité de profils de vent (Nagel *et al.* 2023 ; Sützl, Rooney, and van Reeuwijk 2021). Certains travaux ont déjà permis de tester d'autres paramètres morphologiques (Godłowska and Kaszowski 2019) mais un champ de recherche demeure ouvert.

Outre la considération d'un profil vertical de vitesse de vent, certaines méthodes de modélisation ne s'intéressent qu'à la vitesse du vent au niveau du piéton. De même que précédemment, l'évaluation de la vitesse est réalisée à partir de modèles empiriques qui prennent comme variables explicatives des indicateurs qui décrivent la forme urbaine. C'est par exemple le cas des équations proposées par Y. He, Liu, and Ng (2022) qui relient la vitesse observée proche du sol à des indicateurs qui décrivent l'irrégularité (fragmentation, angularité et sinuosité) et la perméabilité des tissus urbains. Ces équations sont établies à partir d'observations réalisées en soufflerie pour des formes urbaines réelles représentatives de la ville de Hong-Kong. Le vent et les indicateurs sont moyennés au sein de zones de 300 mètres de large. Le vent estimé par ces modèles est donc représentatif du vent moyen dans le quartier et non du vent en un point particulier de l'espace.

#### 4.2.2. Lorsque les obstacles sont considérés individuellement

À une échelle plus fine (résolution de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres), chaque surface de bâtiment est considérée pour le calcul des écoulements. Là encore, les équations de Navier-Stokes peuvent être résolues tant spatialement que temporellement au moyen de méthodes numériques. Cependant, la résolution de ces équations n'implique pas l'utilisation intensive de la géomatique, ces méthodes ne sont donc pas discutées ici. Par contre, ces méthodes, conjointement à des observations en

<sup>24</sup> Deux mesures de distance souvent utilisées en météorologie, représentatives de l'effet de la rugosité d'un ensemble d'obstacles sur l'écoulement de l'air.

<sup>25</sup> Identiques quelle que soit la direction d'analyse.

soufflerie, ont été largement utilisées pour mieux comprendre les interactions entre vent et forme urbaine. Ces résultats ont permis de tirer des enseignements qualitatifs et quantitatifs des phénomènes aérauliques en milieu urbain (Röckle 1990 ; Brown *et al.* 2009).

Outre la résolution des équations de Navier-Stokes, deux autres types de méthodes permettent d'estimer un champ de vitesse autour des bâtiments d'un quartier : des méthodes empiriques ou des méthodes dites semi-empiriques.

#### 4.2.2.1. Méthodes empiriques

Par équation empirique, on entend que les équations ont été établies seulement à partir de relations identifiées entre un champ de vent (observé ou simulé) et des indicateurs spatiaux. Les indicateurs spatiaux peuvent représenter des distances aux obstacles dans des directions particulières de l'espace ou des facteurs de vue qui sont eux-aussi souvent directionnels (Johansson *et al.* 2016 ; Calzolari and Liu 2021 ; Belgacem 2019). Des méthodes statistiques de régression linéaires ou non-linéaires mais aussi des réseaux de neurones ou d'autres méthodes d'apprentissage profond sont utilisées dans le but d'établir des équations entre la vitesse du vent et les indicateurs spatiaux. Ces équations présentent l'avantage de :

- facilement identifier le lien entre forme urbaine et vitesse du vent,
- estimer la vitesse du vent pour un quartier pour lequel aucune observation ou simulation n'a été réalisée.

Cependant, comme toute méthode d'apprentissage supervisée, elle comporte des limites. Le modèle est fiable sous condition que :

- l'échantillon d'apprentissage soit suffisamment conséquent,
- le quartier pour lequel on applique l'équation ne soit pas trop différent de ceux utilisés dans le jeu d'apprentissage,
- les champs de vent utilisés pour l'apprentissage soient fiables.

De plus, les équations développées sont propres à un usage en particulier. De fait, un modèle dédié à l'évaluation du confort à l'échelle du piéton permettra d'évaluer la vitesse du vent à 1,5 m du sol et ne pourra pas être utilisé pour estimer le transport et la diffusion de polluants ni l'effet du vent sur la ventilation naturelle des bâtiments.

#### 4.2.2.2. Méthodes semi-empiriques

D'autres modèles ont une base empirique mais respectent certaines lois de la physique. C'est le cas des modèles qui sont basés sur l'approche dite de Röckle (1990) qui est à notre connaissance le premier à avoir proposé ce type de modélisation. C'est une approche qui permet d'estimer le vent dans les trois dimensions de l'espace et selon ses trois composantes. Elle repose sur deux étapes. La première, empirique, permet d'initialiser le champ de vitesse dans des zones situées autour des bâtiments (cf. figure 6). La seconde étape consiste à équilibrer le champ de vitesse de manière à ce que le débit d'air soit conservé entre toutes les cellules du volume simulé, tout en minimisant les modifications à apporter au champ de vitesse établi à l'issue de l'étape d'initialisation. À notre connaissance, quatre logiciels intègrent actuellement cette méthode : QUIC-URB (Brown *et al.* 2009), SkyHelios (Fröhlich and Matzarakis 2018), QES-Wind (Margairaz *et al.* 2022) et URock (Bernard *et al.* 2023). Les zones et équations utilisées lors de la phase d'initialisation sont sensiblement les mêmes dans ces quatre outils. La force de ces modèles par rapport aux modèles classiques de simulation du vent réside dans leur coût de calcul largement plus faible et dans leur simplicité d'usage (ces modèles sont relativement stables et ne demandent donc pas une connaissance fine des outils de simulation numérique pour obtenir un champ de vent fiable). Cependant, leur précision reste largement moindre en comparaison des outils de simulation classiques lorsque ces derniers sont bien utilisés. À noter que l'engouement pour ce type de modèle est relativement récent, il existe donc un vrai potentiel d'amélioration, notamment de l'identification et la mise en équation de zones aérauliques particulières (e.g. pour les cours intérieures ou le long des flancs de bâtiments). Ceci est d'autant plus vrai que de plus en plus de données issues de



simulations réalisées pour de grandes étendues sur des formes de quartiers réels sont disponibles gratuitement dans des dépôts destinés aux données de la recherche. Par-delà l'effet des formes urbaines sur l'apparition de phénomènes aérauliques particuliers dans certaines zones de l'espace, la topographie a également une influence sur les écoulements de l'air (à plus large échelle mais pouvant impacter les profils de vent utilisés à l'échelle d'un quartier). Actuellement, aucun des quatre outils cités précédemment n'a proposé de zones aérauliques spécifiques à certaines particularités topographiques (vallées, falaises, etc.) alors qu'un réel besoin a récemment été mis en évidence (Robinson *et al.* 2023, 202). Il existe donc ici aussi un domaine de recherche pour lequel la géomatique a largement sa place, à savoir (i) définir des algorithmes pour identifier des objets géographiques particuliers, (ii) définir des règles pour initialiser le comportement du vent dans des volumes de l'espace proches de ces objets.

### 4.3. Discussion

En dehors des différentes méthodes présentées ici, qui permettent d'estimer les écoulements à partir d'éléments de la forme urbaine, des méthodes originales ont récemment vu le jour pour observer le vent en milieu urbain, basées sur la géomatique. Ces méthodes à base d'analyse d'images pourraient permettre de créer de la donnée de vent 2D/3D de manière non invasive, et alimenter ainsi la connaissance du lien entre aéraulique et géomatique.

Pour accéder à des observations sur les variations du vent à l'échelle de la ville, on peut mailler l'espace par un nombre élevé de capteurs (que ce soit un maillage au sol ou en vertical, comme c'est le cas par exemple des tours à flux), utiliser la simulation (qui a fait l'objet de la section précédente) ou encore utiliser des données de télédétection permettant une observation à plus large échelle. Dans ce cas, l'information sur la vitesse du vent n'est pas directement calculable à partir des signaux observés mais elle y apparaît de manière indirecte, la vitesse du vent laissant une signature dans les données. Le processus de mesure requiert ainsi un traitement algorithmique sur ces données qui peut être plus ou moins avancé en fonction de la complexité des observations. L'imagerie optique est le type de télédétection le plus couramment utilisé. Elle utilise la lumière visible, l'infrarouge proche ou l'infrarouge moyen pour collecter des données sur la surface de la Terre. L'observation de deux images séparées par un laps de temps suffisamment court génère un mouvement apparent. Ce mouvement, mesuré en pixel par unité de temps entre deux images et appelé flot-optique, est lié à la vitesse réelle des objets observés par une transformation géométrique dépendant de la résolution spatiale et du temps entre deux images. Ainsi, en observant deux images avec une résolution spatiale et temporelle suffisamment importante (quelques mètres pour l'échelle de la ville) ainsi que des traceurs du vent (comme des nuages, des polluants ou encore des particulesensemencées dans des maquettes expérimentales (Adrian and Westerweel 2011)), il est possible de remonter à la vitesse du vent en chaque pixel de l'image. En fonction de la résolution spatiale, ce vent peut être directement adapté à la ville (si on a un processus d'acquisition d'images dédié à des résolutions spatiales de l'ordre du mètre) ou peut être utilisé pour donner des conditions globales du contexte pour ensuite être interpolé à l'aide de capteurs locaux. La hauteur de mesure sera également fonction des traceurs disponibles.

De nombreuses techniques se sont focalisées à recouvrer le flot-optique dans une séquence de deux ou plusieurs images. La plupart des approches partent du principe que l'objet en mouvement se déplace en conservant sa valeur spectrale. Sur cette base, une des principales familles s'appuie sur la corrélation d'images : pour toute position  $x$  dans la première image  $I_1$ , il s'agit d'extraire une première imagerie  $\mathcal{W}_1(x)$  centrée autour de cette position. Ensuite, on recherche dans la seconde image l'imagerie  $\mathcal{W}_2(x + \mathbf{d}(x))$  qui lui ressemble le plus, c'est-à-dire qui maximise la corrélation entre les deux imageries. La différence de position  $\mathbf{d}(x)$  entre les centres de ces imageries permet de retrouver le déplacement apparent en  $x$ . Cette méthode est largement utilisée en vision par ordinateur pour calculer le flot optique et suivre le déplacement des objets dans des séquences d'images. Une des principales limites de cette approche réside dans sa nature discrète : seuls des déplacements entiers (en nombre de pixels) peuvent être estimés. Une autre limitation concerne la taille des imageries qui influe sur la qualité des résultats : une grande taille ne va estimer que des mouvements dominants tandis qu'une petite taille est très sensible au bruit. Ainsi, de nombreuses variantes ont été proposées pour mesurer des mouvements

sub-pixeliques (Bing *et al.* 2006), pour estimer automatiquement la taille de la fenêtre de corrélation (Lotti and Giraudon 1994) ou encore pour améliorer l'efficacité des calculs (Luo and Konofagou 2010).

Une autre famille de méthode vise à extraire un champ de déplacement  $\mathbf{w}(x)$  en chaque pixel  $x$  de manière globale sur toute l'image. Ainsi, en notant  $I_1(x)$  la valeur spectrale de la première image en un point donné,  $I_2(x + \mathbf{w}(x))$  la valeur de ce même point déplacé par le vecteur de déplacement  $\mathbf{w}(x)$ , on peut, sous cette hypothèse de conservation, écrire la relation suivante :

$$I_2(x + \mathbf{w}(x)) \sim I_1(x)$$

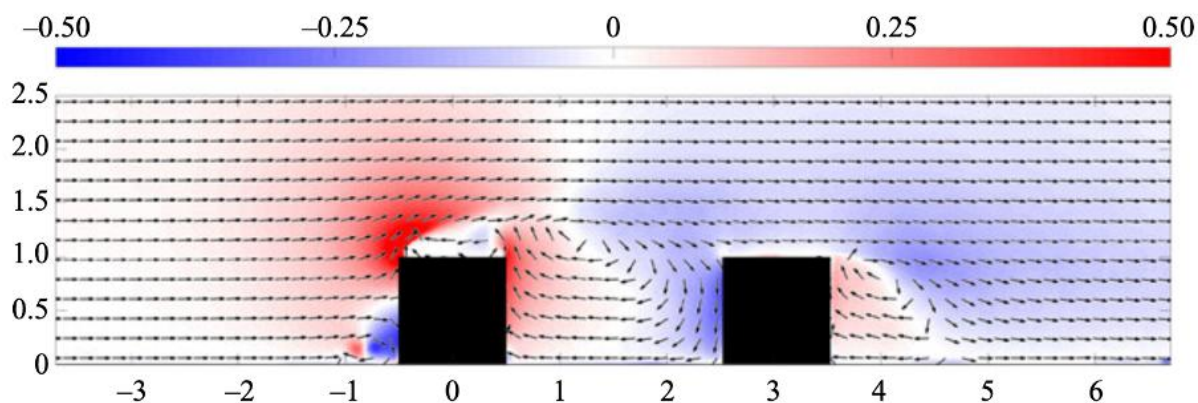
Cette relation est intéressante car elle permet de relier les valeurs spectrales des deux images :  $I_2(x + \mathbf{w}(x)) \sim I_1(x)$  au vecteur de déplacement apparent sous-jacent. La principale difficulté de cette relation est que le vecteur  $\mathbf{w}(x)$  à estimer apparaît ici de manière non-linéaire (il est dans la fonction  $I_2$ ) et est difficile à extraire. Ainsi, une approche classique consiste à linéariser cette équation autour de  $\mathbf{w}(x)$  en supposant ce déplacement de faible amplitude. Cette version linéarisée s'écrit :

$$\mathbf{w}(x) \cdot \nabla I_2(x) + I_2(x) - I_1(x) \sim 0$$

où  $\nabla$  est l'opérateur de gradient spatial. La formulation ci-dessus est connue sous le nom d'équation de contrainte du mouvement apparent (ECMA), et est à la base de nombreuses approches de mesure du mouvement dans des séquences d'images puisqu'elle permet une relation linéaire entre le champ de vecteur  $\mathbf{w}(x)$  à estimer et les gradients spatiaux de la seconde image  $\nabla I_2(x)$  et temporels  $I_2(x) - I_1(x)$  observés. Cependant, l'ECMA est soumise au problème de l'ouverture : dans les zones homogènes, tous les gradients sont nuls et une infinité de solutions est possible. Ainsi, une grande variété de techniques a été proposée pour pallier cette difficulté. Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer l'approche de Lucas and Kanade (1981) qui suppose que le vecteur  $\mathbf{w}(x)$  est homogène dans un voisinage centré ou encore l'approche de Horn and Schunck (1981) qui privilégie les versions lisses du champ de vitesse en minimisant, en plus de l'ECMA, l'amplitude des gradients spatiaux  $|\nabla u(x)|^2 + |\nabla v(x)|^2$  de la vitesse  $\mathbf{w}(x)$  (où  $(u, v)$  sont les composantes du champ de vitesses :  $\mathbf{w}(x) = [u(x), v(x)]^T$ ). Sur cette base, de nombreuses techniques ont été proposées, que ce soit :

- pour mesurer avec précision les discontinuités (Black and Anandan 1993) ;
- pour mesurer les grands déplacements (Brox, Bregler, and Malik 2009) ;
- en proposant des modèles de conservation alternatifs à l'ECMA s'appuyant sur des modèles physiques et en définissant des méthodes de régularisation adaptées à l'estimation de la divergence et de la rotation (Corpetti, Mémin, and Pérez 2002) ;
- en combinant des approches type Lucas and Kanade (1981) avec Horn and Schunck (1981) voir (Bruhn, Weickert, and Schnörr 2005) ;
- en exploitant des modèles physiques lorsque des séquences d'images sont disponibles (Papadakis, Corpetti, and Mémin 2007).

Le lecteur peut se référer aux techniques présentées dans (Bechini and Chandrasekar 2017 ; Li *et al.* 2021 ; L.-P. Wang *et al.* 2015) pour des applications du flot optique en milieu urbain. Une illustration de champ de vitesse est visible en figure 10.



**Figure 10.** Exemple d'un champ de vitesse superposé à sa carte d'amplitude estimée sur une maquette de ville à partir d'images PIV acquises en laboratoire (Jooss *et al.* 2022).

Notons enfin que, depuis une dizaine d'années, des méthodes basées sur des réseaux de neurones ont vu le jour pour mesurer le flot optique dans des images (Dosovitskiy *et al.* 2015). Ces méthodes consistent à entraîner, sur un grand nombre de paires d'images et du champ de déplacement associé, des architectures spécifiques pour prédire la direction et l'amplitude des déplacements pixel à pixel entre deux images successives. Ces réseaux exploitent le plus souvent des architectures convolutionnelles pour capturer les motifs spatiaux et temporels du mouvement. Nous ne les développons pas ici car leur performance dépend souvent des bases de données sur lesquelles elles sont entraînées et il n'y a à ce jour pas de méthode adaptée à la mesure des déplacements en milieu urbain. On peut néanmoins citer la méthode présentée par Zhang *et al.* (2022) qui exploite une base de données dédiée à la mesure des vents mais pas nécessairement dans un contexte urbain.

Si ces méthodes ne font pas un lien direct entre l'analyse de la forme de la ville et les écoulements atmosphériques, certaines études actuelles tentent de trouver des liens entre les formes urbaines (telles que les LCZ) et les statistiques des vents en ville observés par imagerie expérimentale. De plus, ces méthodes mobilisent l'analyse d'image et nécessitent des traitements spatiaux pour localiser précisément le champ de vitesse mesuré. Enfin, elles constituent un excellent complément aux simulations de mécanique des fluides numériques (CFD) ou aux observations en soufflerie pour déduire de nouvelles équations reliant vent et forme urbaine qui pourront être intégrées dans les modèles aérauliques de type Röckle décrits en fin de section précédente.

## 5. Conclusion

Dans cet article, nous avons traité de l'apport de la géomatique et notamment l'analyse de la forme urbaine (principalement l'agencement des rues et des bâtiments) à la modélisation de phénomènes radiatifs et aérauliques, que les modèles soient physiques, géométriques ou statistiques. Si les équations régissant la physique des phénomènes en jeu sont connues, il n'en demeure pas moins qu'elles sont souvent longues à simuler dans un contexte urbain et peu propices à l'explicitation du lien entre les formes urbaines et le phénomène physique étudié. Par contraste, les approches présentées dans cet article visent à coupler la caractérisation du contexte spatial à celle des propriétés induites, qu'il s'agisse de la circulation du vent ou des effets d'ombrage produits dans l'environnement construit. C'est typiquement le cas des méthodes qui lient la classification des écoulements en fonction de la forme urbaine, mais aussi des méthodes qui visent à identifier les zones avec des caractéristiques aérauliques particulières, ou enfin des modèles empiriques et semi-empiriques ayant pour but d'estimer la vitesse du vent à différentes échelles spatiales. Pour mettre en évidence les propriétés intrinsèques des structures urbaines, nous avons introduit les concepts d'approche *plenum* (qui met l'accent sur l'espace interstitiel et sa malléabilité) et *atomiste* (qui considère les bâtiments comme des obstacles influençant le vent). Enfin, nous avons présenté des approches basées sur l'observation et l'expérimentation à partir de l'analyse d'images pour mesurer et caractériser les vents en ville. Cet ensemble d'approches par les effets produits, qu'ils soient aérauliques ou radiatifs, met en évidence l'importance de la forme du territoire étudié, de

sa topographie, de son altimétrie et, conséquemment, des outils conceptuels et méthodologiques de la géomatique. L'apport de cette dernière est indispensable à la bonne compréhension de la spatialité des phénomènes à l'échelle de la ville, et à l'appropriation de nouvelles entités spatiales. Ainsi, identifier des zones avec des caractéristiques aérauliques ou radiatives particulières, peut, par exemple, contribuer à la détermination de corridors frais. Ces derniers deviennent alors de nouvelles entités géographiques immatérielles susceptibles d'alimenter les systèmes et services dédiés à la manipulation de l'information géographique des métropoles. Cette seule évocation justifie de fait le développement d'un domaine d'application de la géomatique dédié plus généralement à l'étude du microclimat urbain.

## 6. Bibliographie

- Adrian, R. J., and J. Westerweel. 2011. *Particle Image Velocimetry*. 30. Cambridge university press.
- Arnfield, A. J. 2003. 'Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island'. *International Journal of Climatology* 23 (1): 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>.
- Bechini, R., and V. Chandrasekar. 2017. 'An Enhanced Optical Flow Technique for Radar Nowcasting of Precipitation and Winds'. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 34 (12): 2637–58.
- Belcher, S. E., N. Jerram, and J. C. R. Hunt. 2003. 'Adjustment of a Turbulent Boundary Layer to a Canopy of Roughness Elements'. *Journal of Fluid Mechanics* 488 (July): 369–98. <https://doi.org/10.1017/S0022112003005019>.
- Belgacem, H. 2019. 'Génération d'un squelette informé et application à l'étude aéraulique de la forme urbaine'. Phdthesis, École centrale de Nantes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03237407>.
- Benedikt, M. L. 1979. 'To Take Hold of Space: Isovists and Isovist Fields'. *Environment and Planning B: Planning and Design*, March. <https://doi.org/10.1068/b060047>.
- Bernard, J., F. Lindberg, and S. Oswald. 2023. 'URock 2023a: An Open-Source GIS-Based Wind Model for Complex Urban Settings'. *Geoscientific Model Development* 16 (20): 5703–27. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5703-2023>.
- Bing, P., X. Hui-Min, X. Bo-Qin, and D. Fu-Long. 2006. 'Performance of Sub-Pixel Registration Algorithms in Digital Image Correlation'. *Measurement Science and Technology* 17 (6): 1615.
- Black, M. J., and P. Anandan. 1993. 'A Framework for the Robust Estimation of Optical Flow'. In *1993 (4th) International Conference on Computer Vision*, 231–36. IEEE.
- Bouyer, J. 2009. 'Modélisation et Simulation Des Microclimats Urbains, Étude de l'impact de l'aménagement Urbain Sur Les Consommations Énergétiques Des Bâtiments'. Thèse doctorat: Sciences pour l'ingénieur. Ambiances architecturales et urbaines, Nantes: Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes; École doctorale Sciences pour l'ingénieur, Géosciences, Architecture (Nantes). TH. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00426508/en/>.
- Brown, M. J., A. Gowardhan, M. Nelson, M. Williams, and E. R. Pardyjak. 2009. 'Evaluation of the QUIC Wind and Dispersion Models Using the Joint Urban 2003 Field Experiment Dataset'. In *8th AMS Urb. Env. Symp.*
- Brox, T., C. Bregler, and J. Malik. 2009. 'Large Displacement Optical Flow'. In *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 41–48. IEEE.
- Bruhn, A., J. Weickert, and C. Schnörr. 2005. 'Lucas/Kanade Meets Horn/Schunck: Combining Local and Global Optic Flow Methods'. *International Journal of Computer Vision* 61: 211–31.
- Caliot, C., R. Schoetter, V. Forest, V. Eymet, and T.-Y. Chung. 2023. 'Model of Spectral and Directional Radiative Transfer in Complex Urban Canopies with Participating Atmospheres'. *Boundary-Layer Meteorology* 186 (2): 145–75. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00750-5>.
- Calzolari, G., and W. Liu. 2021. 'Deep Learning to Replace, Improve, or Aid CFD Analysis in Built Environment Applications: A Review'. *Building and Environment*, September, 108315. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108315>.
- Compagnon, R. 2004. 'Solar and Daylight Availability in the Urban Fabric'. *Energy and Buildings* 36 (4): 321–28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.009>.
- Corpetti, T., É. Mémin, and P. Pérez. 2002. 'Dense Estimation of Fluid Flows'. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 24 (3): 365–80.



- Couclelis, H. 1992. 'People Manipulate Objects (but Cultivate Fields): Beyond the Raster-Vector Debate in GIS'. In *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space, International Conference GIS - From Space to Territory: Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning*, edited by Andrew U Frank, Irene Campari, and Ubaldo Formentini, 65–77. Lecture Notes in Computer Science. Pisa, Italy: Springer. [https://doi.org/10.1007/3-540-55966-3\\_3](https://doi.org/10.1007/3-540-55966-3_3).
- Dosovitskiy, A., P. Fischer, E. Ilg, P. Hausser, C. Hazirbas, V. Golkov, P. Van Der Smagt, D. Cremers, and T. Brox. 2015. 'FlowNet: Learning Optical Flow with Convolutional Networks'. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2758–66.
- Dupagne, A., and J. Teller. 1999. 'La place Saint-Lambert et l'œil liégeois' Annales du bâtiment et des travaux publics 1 33-44 Google Scholar EGUE, 1996, 'European sustainable cities' , Expert Group on the Urban Environment, DG Environment, European Commission, Brussels
- Fröhlich, D., and A. Matzarakis. 2018. 'Spatial Estimation of Thermal Indices in Urban Areas—Basics of the SkyHelios Model'. *Atmosphere* 9 (6): 209. <https://doi.org/10.3390/atmos9060209>.
- Gál, T., and J. Unger. 2009. 'Detection of Ventilation Paths Using High-Resolution Roughness Parameter Mapping in a Large Urban Area'. *Building and Environment* 44 (1): 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.02.008>.
- Godłowska, J., and W. Kaszowski. 2019. 'Testing Various Morphometric Methods for Determining the Vertical Profile of Wind Speed Above Krakow, Poland'. *Boundary-Layer Meteorology* 172 (1): 107–32. <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00440-9>.
- Grimmond, C. S. B., S. K. Potter, H. N. Zutter, and C. Souch. 2001. 'Rapid Methods to Estimate Sky-View Factors Applied to Urban Areas'. *International Journal of Climatology* 21 (7): 903–13. <https://doi.org/10.1002/joc.659>.
- Groleau, D. 2000. 'Solène Un Outil de Simulation Des Éclairements Solaires et Lumineux Dans Les Projets Architecturaux et Urbains'. In *Les Professionnels de La Construction - Confort Intérieur: Outils Informatiques d'aide à La Conception et à La Prévision Du Confort Thermique, Acoustique et d'éclairage Etudes de Cas*, 8. Rouen, France.
- Grosdemouge, V. 2020. 'Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des ÉcoQuartiers'. Phdthesis, Université de la Réunion. <https://doi.org/10/document>.
- Hanna, SR, and RE Britter. 2002. 'Wind Flow and Vapor Cloud Dispersion at Industrial Sites. Am. Inst'. *Chem Eng, New York*.
- He, B.-J., L. Ding, and D. Prasad. 2019. 'Enhancing Urban Ventilation Performance through the Development of Precinct Ventilation Zones: A Case Study Based on the Greater Sydney, Australia'. *Sustainable Cities and Society* 47 (May): 101472. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101472>.
- He, Y., Z. Liu, and E. Ng. 2022. 'Parametrization of Irregularity of Urban Morphologies for Designing Better Pedestrian Wind Environment in High-Density Cities – A Wind Tunnel Study'. *Building and Environment*, October, 109692. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109692>.
- Hillier, B., and J. Hanson. 1984. 'The Social Logic of Space'. Cambridge Core. Cambridge University Press. June 1984. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511597237>.
- Horn, B. KP, and B. G Schunck. 1981. 'Determining Optical Flow'. *Artificial Intelligence* 17 (1–3): 185–203.
- Hsieh, C.-M., and H.-C. Huang. 2016. 'Mitigating Urban Heat Islands: A Method to Identify Potential Wind Corridor for Cooling and Ventilation'. *Computers, Environment and Urban Systems* 57 (May): 130–43. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.02.005>.
- Huang, J., J. Guillermo Cedeño-Laurent, and J. D. Spengler. 2014. 'CityComfort+: A Simulation-Based Method for Predicting Mean Radiant Temperature in Dense Urban Areas'. *Building and Environment* 80 (October): 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.019>.
- Ruas, A., F. Jacquino, Z. Mhedhbi, and F. Betou. 2025. 'Les données topographiques actuelles sont-elles adaptées à l'étude du climat urbain ?'. *Risques Urbains* 1 (8). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2025.1279>
- Johansson, L., S. Onomura, F. Lindberg, and J. Seaquist. 2016. 'Towards the Modelling of Pedestrian Wind Speed Using High-Resolution Digital Surface Models and Statistical Methods'. *Theoretical and Applied Climatology* 124 (1): 189–203. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1405-2>.
- Jooss, Y., R. Bolis, T. Bracchi, and R Jason Hearst. 2022. 'Flow Field and Performance of a Vertical-Axis Wind Turbine on Model Buildings'. *Flow* 2: E10.

- Li, X. 2021. 'Investigating the spatial distribution of resident's outdoor heat exposure across neighborhoods of Philadelphia, Pennsylvania using urban microclimate modeling'. *Sustainable Cities and Society* 72: 103066. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103066>
- Li, H., Y. Zhao, J. Liu, and J. Carmeliet. 2021. 'Physics-Based Stitching of Multi-FOV PIV Measurements for Urban Wind Fields'. *Building and Environment* 205: 108306.
- Lindberg, F., B. Holmer, and S. Thorsson. 2008. 'S. SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings'. *Int J Biometeorol* 52: 697–713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>
- Lindberg, F., C.S.B. Grimmond, A. Gabey, B. Huang, C. W. Kent, T. Sun, N. E. Theeuwes, L. Järvi, H. C. Ward, I. Capel-Timms, Y. Chang, P. Jonsson, N. Krave, D. Liu, D. Meyer, K. F. G. Olofson, J. Tan, D. Wästberg, L. Xue, and Z. Zhang. 2018. 'Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services'. *Environmental Modelling & Software* 99: 70-87. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.020>.
- Lotti, J.-L., and G. Giraudon. 1994. 'Correlation Algorithm with Adaptive Window for Aerial Image in Stereo Vision'. In *Image and Signal Processing for Remote Sensing*, 2315:76–87. SPIE.
- Lu, J., N. Nazarian, M. Hart, S. Krayenhoff, and A. Martilli. 2023. 'A One-Dimensional Urban Flow Model with an Eddy-Diffusivity Mass-Flux (EDMF) Scheme and Refined Turbulent Transport (MLUCM v3.0)'. *EGUsphere*, December, 1–29. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2811>.
- Lucas, B. D., and T. Kanade. 1981. 'An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision'. In *IJCAI'81: 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2:674–79.
- Luo, J., and E. E Konofagou. 2010. 'A Fast Normalized Cross-Correlation Calculation Method for Motion Estimation'. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 57 (6): 1347–57.
- Macdonald, R. W. 2000. 'Modelling The Mean Velocity Profile In The Urban Canopy Layer'. *Boundary-Layer Meteorology* 97 (1): 25–45. <https://doi.org/10.1023/A:1002785830512>.
- Malys, L. 2012. 'Évaluation Des Impacts Directs et Indirects Des Façades et Des Toitures Végétales Sur Le Comportement Thermique Des Bâtiments'. Thèse de doctorat (PhD Thesis), Ecole Centrale de Nantes, ED SPIGA.
- Margairaz, F., H. Eshagh, A. Nemati Hayati, E. R. Pardyjak, and R. Stoll. 2022. 'Development and Evaluation of an Isolated-Tree Flow Model for Neutral-Stability Conditions'. *Urban Climate* 42 (March): 101083. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101083>.
- Merlier, L., F. Kuznik, G. Rusaouën, and S. Salat. 2018. 'Derivation of Generic Typologies for Microscale Urban Airflow Studies'. *Sustainable Cities and Society* 36 (January): 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.017>.
- Middel, A., J. Lukasczyk, R. Maciejewski, M. Demuzere, M. and Roth. 2018. 'Sky View Factor Footprints for Urban Climate Modeling'. *Urban Climate* 25 (September): 120–34. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004>.
- Nagel, T., R. Schoetter, V. Bourgin, V. Masson, and E. Onofri. 2023. 'Drag Coefficient and Turbulence Mixing Length of Local Climate Zone-Based Urban Morphologies Derived Using Obstacle-Resolving Modelling'. *Boundary-Layer Meteorology* 186 (3): 737–69. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00780-z>.
- Oke, T. R. 1978. *Boundary Layer Climates*. Routledge. Taylor & Francis Group.
- . 1981. 'Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations'. *Journal of Climatology* 1 (3): 237–54. <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>.
- . 2006. 'Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites'. World Meteorological Organization (WMO). <https://library.wmo.int/idurl/4/35333>.
- Openshaw, S. 1983. 'The Modifiable Areal Unit Problem'. *CATMOG - Concepts and Techniques in Modern Geography* 38: 41.
- Papadakis, N., T. Corpetti, and E. Mémin. 2007. 'Dynamically Consistent Optical Flow Estimation'. In *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, 1–7. IEEE.
- Peponis, J., J. Wineman, M. Rashid, S. Hong Kim, and S. Bafna. 1997. 'On the Description of Shape and Spatial Configuration inside Buildings: Convex Partitions and Their Local Properties'. *Environment and Planning B: Planning and Design*, October. <https://doi.org/10.1068/b240761>.
- Popovic, M. 2017. 'Potentiel Des Événements Climatiques à l'échelle « pico » Pour l'amélioration Du Confort Thermique Piétonnier'. PhD Thesis, École centrale de Nantes - Université Bretagne Loire. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02142457>.

- Ratti, C, N. Baker, and K. Steemers. 2005. 'Energy Consumption and Urban Texture'. *Energy and Buildings* 37 (7): 762–76. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>.
- Robinson, D., S. Brambilla, M. J. Brown, P. Conry, B. Quaife, and R. R. Linn. 2023. 'QUIC-URB and QUIC-Fire Extension to Complex Terrain: Development of a Terrain-Following Coordinate System'. *Environmental Modelling & Software* 159 (January): 105579. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105579>.
- Röckle, R. 1990. *Bestimmung Der Strömungsverhältnisse Im Bereich Komplexer Bebauungsstrukturen*. na.
- Ruas, A., H. Pham, and L. Pinson. 2019. 'Champs et Objets Pour Mieux Représenter Les Phénomènes Dans Leur Contexte Géographique'. *Revue Internationale de Géomatique* 29 (2): 185–205. <https://doi.org/10.3166/rig.2019.00081>.
- Santiago, J. L., and A. Martilli. 2010. 'A Dynamic Urban Canopy Parameterization for Mesoscale Models Based on Computational Fluid Dynamics Reynolds-Averaged Navier–Stokes Microscale Simulations'. *Boundary-Layer Meteorology* 137 (3): 417–39. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9538-4>.
- Sarradin, F. 2004. 'Analyse morphologique des espaces ouverts urbains le long de parcours : mesure des variations des formes de ciel par la squelettisation'. Phdthesis, Université de Nantes. <https://doi.org/10/document>.
- Schoetter, R., Y. T. Kwok, C. de Munck, K. K. L. Lau, W. K. Wong, and V. Masson. 2020. 'Multi-Layer Coupling between SURFEX-TEB-v9.0 and Meso-NH-v5.3 for Modelling the Urban Climate of High-Rise Cities'. *Geoscientific Model Development* 13 (11): 5609–43. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5609-2020>.
- Siret, D. 2018. 'Appréhender le confort thermique à l'échelle "pico" : vers de nouvelles perspectives pour l'aménagement urbain'. *Construction21 France Dossier « îlots de chaleur »* : en ligne.
- Southworth, M., and E. Ben-Joseph. 2013. *Streets and the Shaping of Towns and Cities*. Island Press.
- Stewart, I. D., and T. R. Oke. 2012. 'Local Climate Zones for Urban Temperature Studies'. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93 (12): 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- Sützl, B. S., G. G. Rooney, and M. van Reeuwijk. 2021. 'Drag Distribution in Idealized Heterogeneous Urban Environments'. *Boundary-Layer Meteorology* 178 (2): 225–48. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00567-0>.
- Teller, J. 2001. 'La Régulation Morphologique Dans Le Cadre Du Projet Urbain. Spécification d'instruments Informatiques Destinés à Supporter Les Modes de Régulation Performantiels'. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/18578>.
- Teller, J., and S. Azar. 2001. 'Townscope II—A Computer System to Support Solar Access Decision-Making'. *Solar Energy* 70 (3): 187–200. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00097-9).
- Wang, L.-P., S. Ochoa-Rodriguez, J. Van Assel, R. Daniel Pina, M. Pessemier, S. Kroll, P. Willems, and C. Onof. 2015. 'Enhancement of Radar Rainfall Estimates for Urban Hydrology through Optical Flow Temporal Interpolation and Bayesian Gauge-Based Adjustment'. *Journal of Hydrology* 531: 408–26.
- Wang, W., D. Wang, H. Chen, B. Wang, and X. Chen. 2022. 'Identifying Urban Ventilation Corridors through Quantitative Analysis of Ventilation Potential and Wind Characteristics'. *Building and Environment*, February, 108943. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108943>.
- Zhang, Q., J. Xu, M. Crane, and C. Luo. 2022. 'See the Wind: Wind Scale Estimation with Optical Flow and VisualWind Dataset'. *Science of The Total Environment* 846: 157204.