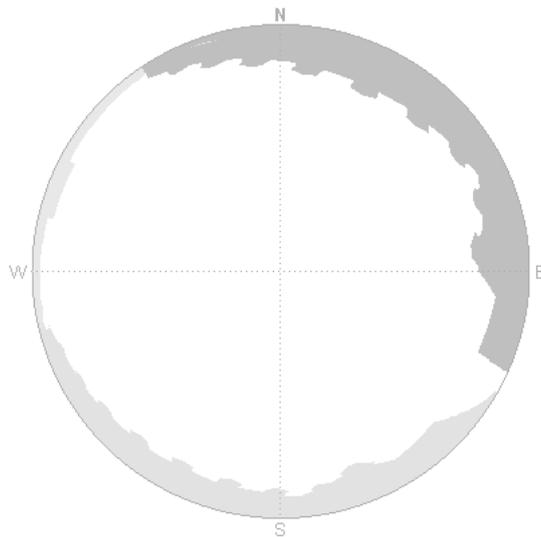


EVALUTATION DE LA LUMIERE DU JOUR A L'ECHELLE URBAINE



Rapport de stage : ISA5 – Année 2019/2020

Auteur : Valentin LAHAYE
Tuteurs : Elena GARCIA NEVADO
Benoit BECKERS

REMERCIEMENT

Le modèle urbain utilisé comme point de départ pour cette étude a été développé par Elena Garcia Nevado, dans le cadre de la "*IV Winter School on Architecture and Urban Physics*", célébré au *Politecnico di Torino* du 29 janvier au 8 février 2020, à Turin (Italie).

Résumé

Ce rapport a pour objectif d'évaluer la lumière naturelle domestique à l'échelle urbaine. Il présente ainsi un ensemble d'indicateurs qui évaluent la qualité de la lumière naturelle au sein d'un local. Ils sont séparés en deux catégories suivantes : les indicateurs statiques et les indicateurs dynamiques. La majorité de ces indicateurs nécessite de passer par une maquette numérique en 3 dimensions, dans laquelle les dimensions précises du local sont intégrées. La surface de calcul représente une surface horizontale d'une superficie équivalente à celle du local (généralement un plan de travail à une hauteur d'environ 0.85 m).

Dans le cas d'une évaluation d'un ensemble d'appartements à l'échelle urbaine où la géométrie des locaux est inconnue, ces indicateurs paraissent inadaptés. Il est proposé ici d'utiliser un indicateur statique purement géométrique ignoré des réglementations et normes, le « Sky View Factor » (SVF) (Facteur de Vue du Ciel). Il se calcule sur des surfaces qu'elles que soient leurs orientations (comme la façade d'une rue), et permet d'établir une première évaluation du potentiel lumineux d'un ensemble d'appartements d'un quartier à partir de la géométrie extérieure seulement.

Une valeur limite de SVF calculée en façade est proposée dans ce rapport, et permet d'établir un critère discriminant défini par la hauteur à partir de laquelle les appartements où la lumière naturelle est insuffisante. Ce seuil peut être illustré sur une cartographie de la ville en 2 dimensions, ce qui donne la possibilité aux urbanistes et aux architectes d'identifier les quartiers sensibles au manque de lumière naturelle.

Abstract

This report presents the majority of indicators that qualify daylight in a room. They are separate into the following two categories: static indicators and dynamic indicators. Most of these indicators require a 3-dimensional digital model, in which the precise dimension of the room is integrated. The calculation surface represents a horizontal surface with an area equivalent of the room's size (generally a work surface with height around 0.85 m).

In the case of a daylight evaluation of apartments on an urban scale where the geometry of the premises is unknown, these indicators appear inadequate. It is proposed to use a purely geometric static indicator ignored by regulations and standards, the Sky View Factor (SVF). It can be calculated on surfaces regardless of their orientation (such as the street facade), and makes it possible to establish a first evaluation of the daylight potential in apartments of street from the geometry exterior only.

A limit value of SVF calculated on the facade is proposed in this report, and makes possible to establish a criterion defined by the height from which the apartments do not have sufficient daylight supplies. This threshold can be illustrated on a 2-dimensional map of the city, which gives architects the opportunity to identify areas sensitive to the lack of daylight.

TABLE DES MATIERES

Introduction	6
Etat de l'Art	7
Lumière naturelle : Energie, Confort et Santé	7
Indicateurs et Normes	9
Indicateurs statiques	9
Indicateurs dynamiques	11
Indicateurs à l'échelle urbaine	15
Géométries	15
Matérialité	15
SVF : Indicateur statique & purement géométrique	16
Cas d'étude : « Piazza Palazzo di Città » à Turin	17
Objectifs	17
Méthodologie	18
SVF calculé dans les espaces intérieurs	18
SVF calculé sur les façades	20
Résultats	21
Critère d'évaluation	21
Discussions	27
Conclusion	32
Bibliographie	33

INTRODUCTION

La lumière est un phénomène physique permettant de rendre visible tout objet. La lumière dite « naturelle » est directement issue du Soleil, immense foyer lumineux. Son intensité et son angle d'incidence sont variables en fonction du temps, de la position géographique, mais aussi du climat. La lumière artificielle est quant à elle présente sous plusieurs formes (feu, ampoule, etc.) et permet de se soustraire du soleil, et de s'émanciper ainsi des variables précédentes.

La richesse du rayonnement solaire présente néanmoins des avantages considérables par rapport à la lumière artificielle. L'exposition au soleil a démontré scientifiquement ses bienfaits, comme la synthèse de vitamine D dans l'organisme humain. Mais à l'inverse, on a des exemples nombreux d'infirmités, de maladies, et d'accidents que peuvent causer le manque de lumière naturelle.

Dans les logements, la qualification de la lumière naturelle est synonyme de confort visuel. Elle se retrouve normée à travers un florilège de normes, et sa quantification précise n'est possible que par l'intermédiaire de la simulation numérique où la géométrie et la matérialité de l'espace intérieur sont clairement identifiées. Les différents indicateurs issus de cette quantification sont décrits dans la première partie de ce rapport.

A l'échelle urbaine, la densification des villes occasionne souvent des « canyons urbains », décrits comme des rues où la lumière naturelle peine à se frayer un chemin jusqu'à l'intérieur des appartements (notamment ceux qui se situent dans les premiers niveaux). Faute d'indicateurs déterminés directement à partir de la typologie urbaine, il est difficile pour les urbanistes de situer les quartiers sensibles au manque de lumière naturelle.

C'est pourquoi la deuxième partie de ce rapport propose un indicateur à l'échelle urbaine qui permet d'évaluer le potentiel lumineux d'un ensemble d'appartements issu d'un même quartier. A partir d'une maquette numérique urbaine, son but est d'identifier les logements prédisposés au manque de lumière naturelle. Cette identification s'illustre par l'intermédiaire d'un cas d'étude d'une rue à Turin : la Piazza Palazzo di Città. Cet espace a la particularité d'intégrer une rue étroite, ainsi que deux places dont les tailles sont différentes. Un lien entre la typologie urbaine et l'évaluation du potentiel lumineux des appartements sous-jacents est estimé à l'issue de ce rapport.

ETAT DE L'ART

LUMIERE NATURELLE : ENERGIE, CONFORT ET SANTE

La conception lumineuse à l'intérieur d'un bâtiment doit permettre de répondre aux besoins des usagers, en terme de confort physiologique et visuel. Cela implique de s'intéresser à la distribution lumineuse et à leurs différentes sources. Mais composer avec la lumière naturelle et la lumière artificielle suscite aussi bien des problématiques énergétiques que des impacts sur le confort et sur la santé.

Dans le prolongement des préoccupations environnementales et économiques, l'utilisation de l'éclairage naturel permet de se soustraire à l'utilisation de la lumière artificielle, qui nécessite des installations supplémentaires et une source d'énergie électrique. En France, la proportion de la consommation électrique liée à l'éclairage est de l'ordre de 10%, est généralement consommée en journée (ADEME 2017). La contribution des bâtiments résidentiels en représente 26%, ce qui n'est pas négligeable (Figure 1)

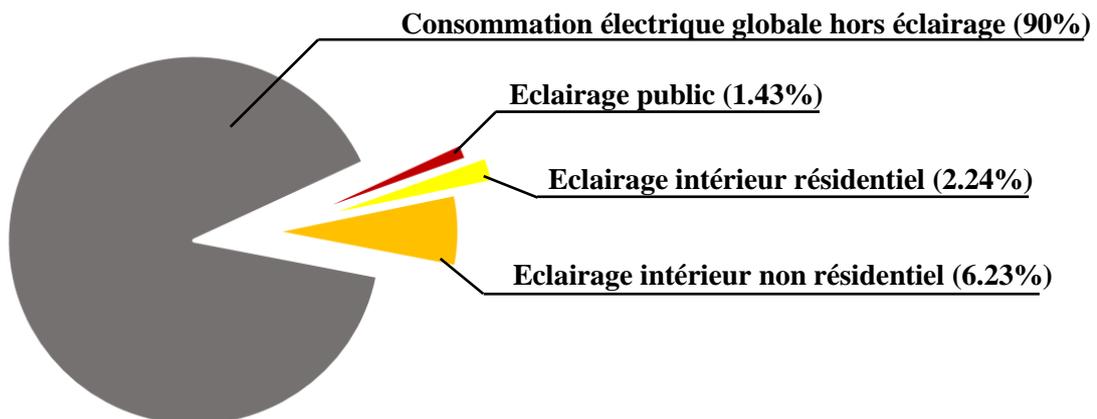


Figure 1 : part de l'éclairage dans la consommation électrique globale en 2013 (source : ADEME)

En France, la seule réglementation énergétique (RT2012) qui encadre légalement les constructions neuves et les travaux de rénovation se focalise sur la consommation énergétique globale. Elle comprends donc à la fois les consommations liées au chauffage, à l'eau chaude sanitaire, et à l'éclairage (ADEME s. d.). Cette dernière, issue de l'éclairage artificiel, est calculée à partir de plusieurs critères dont les principaux sont : l'éclairement requis, la puissance installée, et la surface considérée. L'apport d'éclairage naturel est dimensionné par l'intermédiaire d'un ratio entre la surface vitrée et la surface habitable et est équivalent à 16% (MEDDE 2013). Quantitativement, sa contribution se limite à définir la surface considérée pour le calcul de la lumière artificielle à 25% de la surface bénéficiant de la lumière naturelle. S'agissant d'un indicateur global d'efficacité énergétique, la réglementation néglige la conception qualitative de la lumière naturelle.

Pourtant, hormis la performance énergétique, l'éclairage naturel a un impact direct sur le confort et la santé des usagers. Les différences entre le spectre radiatif de la lumière émise par le soleil et de celle émise par une ampoule électrique impactent différemment l'organisme. La lumière artificielle perturbe le rythme circadien, l'humeur et le comportement, alors que la lumière naturelle (dont le spectre se trouve principalement dans les ultra-violets) permet à l'organisme de synthétiser de la vitamine D (Webb 2006). En ce sens, la lutte du « ministère contre l'habitat indigne » définit comme indécent « tout logement qui ne permet pas l'exercice d'activités normales de l'habitation sans le secours de la lumière naturelle » (DIHAL 2013). Cette préconisation souligne la nécessité d'avoir recours à des indicateurs clairs pour caractériser la qualité de la lumière naturelle au sein d'un habitat.

INDICATEURS ET NORMES

Un indicateur permet de qualifier ou d'illustrer la perception d'une situation à partir de la quantification d'un phénomène physique. Idéalement, ce dernier doit corrélérer un maximum avec les normes en application. La grandeur physique qui permet de quantifier la lumière et qui est la plus utilisée dans les normes est l'illuminance d'une surface plane (généralement un plan de travail) (Tregenza et Mardaljevic 2018). Mesurable, cette grandeur donne la possibilité de transposer les résultats simulés avec la réalité.

Les différents indicateurs sont calculés sur la base d'un modèle géométrique en 3 dimensions. Ils font intervenir deux paramètres principaux : l'illuminance (lux), et la surface étudiée (m²). Certains sont complétés par un dernier paramètre : le temps (h). Les indicateurs se scindent ainsi en deux catégories principales : les indicateurs statiques (atemporels), et les indicateurs dynamiques (mesurés sur une période, ou à un moment précis).

1) INDICATEURS STATIQUES

Les indicateurs statiques peuvent se calculer à partir d'une seule simulation unique avec un ciel uniforme, ou bien par un simple calcul géométrique. Il s'agit d'indicateurs atemporels, indépendants de l'orientation et la localisation géographique.

Les indicateurs statiques calculés sur la base d'un ciel standard utilisent un ciel nuageux et un soleil fixe normalisé par la Commission Internationale de l'Eclairage CIE (Moon et Spencer 1942). La luminance du ciel représentée est globalement uniforme, l'orientation du bâtiment n'a donc aucune incidence sur les résultats (Mardaljevic, Heschong, et Lee 2009). Admettant un calcul plus rapide réalisé dans des conditions jugées défavorables, ils constituent une première approche permettant d'évaluer rapidement la qualité de la lumière naturelle.

L'indicateur statique le plus utilisé dans cette famille est le facteur de lumière du jour (FLJ) ou « Daylight Factor » (DF). Exprimé en pourcentage, il s'agit du rapport d'éclairement entre la surface horizontale analysée et une surface de référence située à l'extérieur, sans aucune obstruction (Mardaljevic et al. 2009). Cet indicateur est le seul à qualifier la lumière naturelle en comparant deux ambiances comme le fait l'œil humain (Linney 2008). De plus, il prend en compte les bénéfices liés aux phénomènes de réflexion, et intègre donc les propriétés des matériaux. Il est utilisé dans plusieurs pays comme dans la certification française HQE (HQE s. d.), la certification Australienne GREENSTAR (GBCA 2020), et la certification Britannique BREEAM (Building Research Establishment s. d.).

Parmi les indicateurs statiques géométriques, on en soulignera trois. Le premier est un simple ratio d'ouverture, qui représente le rapport entre la surface vitrée et la surface totale du logement (1/6 pour HQE) ou la façade (1/6 pour la RT2012). Les deux indicateurs suivants représentent deux façons de mesurer la quantité du ciel visible depuis un point. Ils sont issus de recherches scientifiques et ne sont pas implémentés dans des normes ou des certifications.

Le « Sky View Factor » (SVF) correspond à la proportion de ciel observable en tout point d'une surface. Il est à la base des équations de radiativité entre le ciel et cette surface. Ainsi, en supposant l'illuminance homogène d'un ciel couvert, tout point d'une surface recevra une illuminance proportionnelle à son SVF. Cet indicateur a été utilisé pour décrire les conditions de lumière de surfaces horizontales et, plus exceptionnellement, verticales (Garcia-Nevado et al. 2015). Un SVF supérieur à 2-3% sur une surface horizontale assure un apport de lumière naturelle suffisant par temps couvert en journée (Beckers et Rodríguez 2009).

Le « Sky Solid Angles » (SSA) correspond à la proportion de ciel observable depuis n'importe quel point d'une scène. Il s'agit d'un angle solide simple sans aucune relation avec une surface de référence. Son calcul au centre d'une fenêtre permet d'évaluer l'apport de lumière naturelle d'un plan de travail sous-jacent. Une valeur de 35% est considérée comme satisfaisante (Capeluto 2003).

RECAPITULATIF DES INDICATEURS STATIQUES	
Désignation	Normes / Certifications / Réglementations
<p>Daylight Factor (DF)</p> <p>■ ■ <i>Facteur de lumière du jour (FLJ)</i></p> <p>Rapport entre l'éclairement intérieur reçu d'un point du plan de référence (plan de travail), et l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé. Le ciel couvert normalisé CIE doit être utilisé</p>	<p><u>HQE:</u> <i>Objectif : DF de 1.5% sur 80% de la surface du local</i></p> <p><u>LEED:</u> <i>Objectif : DF de 2% sur 50% des espaces occupés</i></p> <p><u>GREENSTAR:</u> <i>Objectif : DF de 2% sur les espaces de travail</i></p> <p><u>BREEAM:</u> <i>Objectif : DF de 2% sur 80% de la surface du local</i></p>
<p>Ratios et indice d'ouverture</p> <p>Pourcentage de surface vitrée par rapport à la façade ou par rapport à la surface totale du logement.</p>	<p><u>RT2012:</u> <i>Objectif : 16.6% de la façade</i></p> <p><u>HQE:</u> <i>Objectif : 16.6% de la surface du logement</i></p>
<p>Sky View Factor (SVF)</p> <p>■ ■ <i>Facteur de vue du ciel (FVC)</i></p> <p>Portion (en %) de ciel observable en un point d'une la surface considérée.</p>	- Non appliqué-
<p>Sky Solid Angles (SSA)</p> <p>■ ■ <i>Facteur d'angles solides (FAS)</i></p> <p>Portion (en %) de ciel observable en un point d'un espace.</p>	- Non appliqué-

2) INDICATEURS DYNAMIQUES

Les indicateurs dynamiques intègrent un calcul itératif par pas de temps. Ils considèrent ainsi l'irrégularité du ciel au cours de l'année, impactant la distribution lumineuse (Mardaljevic 1999). Le ciel est modélisé à partir de fichiers météorologiques représentant des années typiques (Wilcox et Marion 2008). Cela donne des informations sur le rayonnement direct et diffus du ciel. Comme les phénomènes de réflexion sont quantifiés dans les moteurs de calculs, la prévision de l'illuminance de la surface étudiée est affinée. Cependant, il faut considérer les propriétés de matériaux, menant à un niveau de détail du modèle plus élevé. Bien que le développement des outils de simulations numérique permet de fournir ces résultats précis (Ward et Shakespeare 1998), les durées de calculs sont relativement longues.

Le choix du critère discriminant parmi les paramètres génère la pluralité d'indicateurs dynamiques. Ils sont généralement temporels ou spatiaux (vérifiant le seuil d'une période ou d'une surface), et peuvent considérer un niveau d'éclairement qui assure un usage suffisant de lumière naturelle, ou qui anticipe des phénomènes d'éblouissement.

Parmi les indicateurs les plus utilisés on compte le « Daylight Autonomy » (DA) et le « Spatial Daylight Autonomy » (sDA). Le « Daylight Autonomy » est un indicateur temporel. Il se définit comme le pourcentage d'heures occupées sur une année durant lesquelles le niveau d'éclairement minimum est maintenu grâce à la lumière naturelle (Reinhart et Walkenhorst 2001). Cet indicateur est utilisé dans la normalisation européenne NF-EN-17037 (AFNOR 2018) et est également employé dans la certification britannique BREEAM (Building Research Establishment s. d.). Le « Spatial Daylight Autonomy » quant à lui, est un indicateur spatial. Il est défini comme le pourcentage de surface de travail où un niveau d'éclairement naturel minimum est atteint pour une fraction donnée des heures d'utilisation du bâtiment sur une année (IES 2020). Cet indicateur est utilisé dans la certification américaine LEED (The U.S. Green Building Council s. d.).

Concernant les indicateurs qui évaluent l'éblouissement, on compte le « Daylight Glare Probability » (DGP) et le « Annual Solar Exposure » (ASE), respectivement utilisés dans la normalisation européenne NF-EN-17037 et dans la certification américaine LEED. Ces derniers concernent des espaces où les occupants ne peuvent pas choisir leur direction d'observation et leur position. Bien qu'utiles aux environnements de bureaux, ils semblent inadaptés pour des logements.

RECAPITULATIF DES INDICATEURS DYNAMIQUES

Désignation	Normes / Certifications / Réglementations
<p style="text-align: center;">Daylight Autonomy (DA)</p> <p style="text-align: center;">■ ■ Autonomie lumineuse</p> <p>Pourcentage d'heures occupées par année, pour lesquelles un niveau d'éclairage minimum est maintenu grâce à la seule lumière naturelle.</p>	<p><u>BREEAM :</u> <i>Objectif : DA annuelle de 30% (2650h) en considérant les paramètres suivants :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'éclairage minimum : 200 lux - Surface considérée : 80% de la surface du local <p><u>NF EN 17037:</u> <i>Objectif : DA annuelle de 25% (2190 h) en considérant les paramètres suivants :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'éclairage minimum : 100 lux - Surface considérée : 95% de la surface du local & - Niveau d'éclairage minimum : 300 lux - Surface considérée : 50% de la surface du local
<p style="text-align: center;">Spatial Daylight Autonomy (sDA)</p> <p style="text-align: center;">■ ■ Autonomie lumineuse spatiale</p> <p>Pourcentage de surface de travail où un niveau d'éclairage naturel minimum est atteint pour une fraction donnée des heures d'utilisation du bâtiment pour une année.</p>	<p><u>LEED :</u> <i>Objectif : sDA de 55% de la surface en considérant les paramètres suivants :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'éclairage minimum : 300 lux - Moments considérés : équinoxe par temps clair à 9h et 15h
<p style="text-align: center;">Annual Solar Exposure (ASE)</p> <p style="text-align: center;">■ ■ Exposition solaire annuelle</p> <p>Pourcentage de surface sur laquelle un niveau d'éclairage naturel maximum n'est pas atteint pendant une fraction de l'année.</p>	<p><u>LEED :</u> <i>Objectif : ASE maximum de 10% de la surface du local en considérant les paramètres suivants :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'éclairage maximum : 1000 lux - Durée minimale : 250h

<p>Daylight Glare Probability (DGP)</p> <p>■ ■ Probabilité d'éblouissement par la lumière naturelle</p> <p>Probabilité d'éblouissement par la lumière naturelle pour une fraction de la durée d'utilisation définie.</p>	<p><u>NF EN 17037:</u> <i>Objectif : DGP maximum de 0.45 en considérant les paramètres suivants :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Fraction de la durée d'utilisation : 5% - Durée d'utilisation : jours ouvrés de 8h à 18h
<p>Usefull Daylight Illuminance (UDI)</p> <p>■ ■ Eclairage naturel utile</p> <p>Proportion d'éclairage sur le plan de travail, compris dans un intervalle de valeur considéré comme utile par les utilisateurs au cours d'une année.</p>	<p>- Non appliqué-</p>
<p>Maximum Daylight Autonomy (maxDA)</p> <p>■ ■ Autonomie lumineuse maximale</p> <p>Cet indicateur a pour but de déterminer les risques d'éblouissement ou de gains thermiques excessifs. Un facteur d'autonomie lumineuse maximal (maxDA) est défini pour mettre en évidence les sources lumineuses intenses ou la lumière directe du soleil. Une tache est susceptible d'être éblouissante si l'éclairage calculé est strictement supérieur à 10 fois la valeur de l'éclairage moyen fixé</p>	<p>- Non appliqué-</p>

<p>Continuous Daylight Autonomy (cDA)</p> <p>■ ■ <i>Autonomie lumineuse continue</i></p> <p>Cet indicateur fonctionne comme le DA à la différence près que lors du calcul, si l'objectif (exemple 300lux) n'est pas atteint (exemple 200lux) des points seront tout de même attribué (pour un cDA300, $200\text{lux} / 300\text{lux} = 0,67$ contrairement au calcul de la DA qui n'attribue aucun point dès que la valeur est en dehors de la cible).</p>	<p>- Non appliqué-</p>
<p>Inverse Daylight Autonomy (DAq)</p> <p>■ ■ <i>Autonomie lumineuse inverse</i></p> <p>Il est défini en fonction d'un seuil. Les valeurs d'éclairiments intérieurs calculées entre 8h30 et 17h30 sont triées par ordre croissant puis le pourcentage de valeur sous le seuil de 300 lux est déterminé. On obtient le pourcentage d'heures durant lesquelles la lumière naturelle seul ne permet pas de garantir l'éclairiment minimum fixé</p>	<p>- Non appliqué-</p>

INDICATEURS A L'ECHELLE URBAINE

Les indicateurs usuels délaissent l'évaluation du potentiel lumineux à l'échelle de la ville ce qui nécessite d'adapter un indicateur pour une application urbaine. L'objectif étant de cibler les zones sujettes au manque de lumière naturelle en ville, l'indicateur approprié doit essentiellement permettre de quantifier un niveau d'éclairage minimum. Il est usuellement employé pour des locaux où les géométries et les propriétés des matériaux peuvent être définis précisément (habituellement un appartement ou des bureaux). Mais le manque d'information sur la ville concernant sa géométrie, et plus profondément sa matérialité nécessite une approche différente.

1) GEOMETRIES

Les indicateurs couramment utilisés considèrent généralement la proportion de surface d'un local recevant un certain niveau d'illuminance. La géométrie intérieure doit donc être clairement définie car cette proportion peut varier pour deux appartements de même surface et de profondeurs différentes (MEDDE 2013). Privés, les logements sont souvent soumis à des agencements particuliers, il est donc difficile de modéliser tous les espaces intérieurs. Cela aboutirait même à une maquette urbaine trop complexe, et donc soumise à de lourds temps de calculs.

La géométrie extérieure de la ville (rues, quartiers, places, etc.), est modélisable de plusieurs manières. La facilité d'accès aux ressources satellites permet de réaliser une maquette urbaine tout à fait convenable via l'utilisation de logiciels DAO (GOOGLEMAPS 2020). Egalement, un modèle de données standard ouvert (CITYGML) permet d'accéder directement à des maquettes numériques urbaines, et propose différents niveaux de détails (Gröger et Plümer 2012).

Idéalement, un indicateur adapté doit donc pouvoir se calculer à partir de la géométrie extérieure de la ville, tout en établissant un lien avec les espaces intérieurs. En illustrant les résultats sur la peau extérieure des quartiers, cela permettrait également de faciliter la communication avec les urbanistes.

2) MATERIALITE

Les différents revêtements de façades, ainsi que leurs états, ont une influence sur leur réflectivité. Même s'il était possible de tous les répertorier, il en résulterait une maquette numérique urbaine trop complexe. Cela compromet la considération des phénomènes de réflexions issus des rayonnements directs et diffus proposée par l'ensemble des indicateurs dynamiques. Un indicateur statique et purement géométrique semble donc convenir davantage.

3) SVF : INDICATEUR STATIQUE & PUREMENT GEOMETRIQUE

Cet indicateur permet de ne considérer que la géométrie de la ville, ce qui permet d'introduire une maquette numérique urbaine simple. Calculable sur des surfaces verticales ou horizontales, il permet d'établir un lien entre l'environnement intérieur (plan de travail) et extérieur (façade d'un bâtiment).

Il permet des analyses plus robustes car la géométrie urbaine est moins susceptible de changer que ses revêtements. La considération bénéfique des phénomènes de réflexion apparaît alors comme une première solution pour traiter localement une zone sensible.

Le cas d'étude présenté ci-après introduit l'utilisation du « Sky View Factor » comme un indicateur permettant d'évaluer le potentiel lumineux d'un ensemble d'appartements à l'échelle urbaine.

CAS D'ETUDE : « PIAZZA PALAZZO DI CITTA » A TURIN

OBJECTIFS

Ce cas d'étude fait suite à la première partie de rapport « Partie 1- Rapport Héliodon ». Son objectif principal est de proposer un critère d'évaluation du potentiel lumineux d'un ensemble des appartements d'une rue à partir d'une maquette numérique urbaine purement géométrique (figure 2).

Pour que le critère soit exploitable, trois directives lui sont soumises.

- Il doit être **discriminant** : son utilisation doit permettre de cibler les appartements d'une rue ou d'un quartier susceptibles de manquer de lumière naturelle.
- Son **calcul** doit être **simple**, et rapide : les résultats doivent pouvoir être étendus à plusieurs quartiers, voire plusieurs villes.
- Il doit permettre **d'illustrer une situation** : sa compréhension doit permettre d'échanger avec les urbanistes et les architectes.

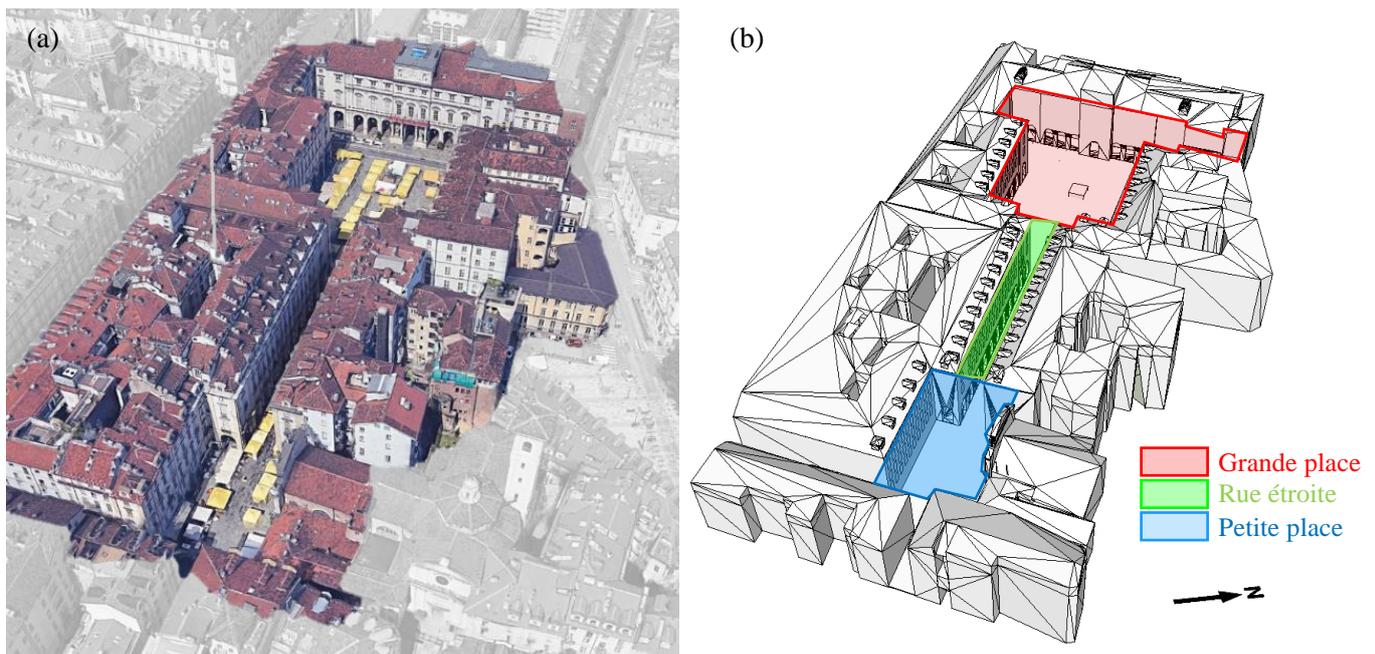


Figure 1: comparaison de la maquette géométrique urbaine avec une vue satellite extraite d'un logiciel.

(a) vue extraite du logiciel GOOGLE EARTH

(b) maquette numérique urbaine

METHODOLOGIE

1) SVF CALCULE DANS LES ESPACES INTERIEURS

Le logiciel HELIODON (Beckers et Masset 2006) permet de calculer des valeurs de SVF en plusieurs points d'une surface issue d'un modèle géométrique en 3 dimensions. Ce calcul peut s'effectuer pour des surfaces, quelle que soit leur orientation. Dans ce travail, on analyse des surfaces verticales et horizontales.

Dans un premier temps, des appartements types sont modélisés au niveau des deux premiers étages, cas jugés les plus défavorables en terme de lumière naturelle (voir figure 3). La surface de calcul est horizontalement placée à une hauteur de 1m, sur toute la surface de l'appartement. Ces derniers sont positionnés à divers emplacements de la rue et des places (voir figure 4).

Ces 6 différents emplacements intégrés à la maquette numérique permettent d'analyser l'influence de la typologie urbaine sur les apports de lumière naturelle pour un même espace intérieur. Pour faciliter cette analyse, une façade de la petite place exposée au sud a été modélisée pour remplacer la Basilique Corpus Domini (voir figure 5).

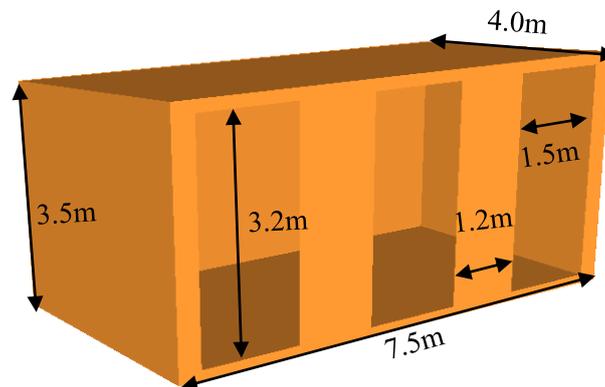


Figure 2: appartement type intégré dans la maquette numérique urbaine

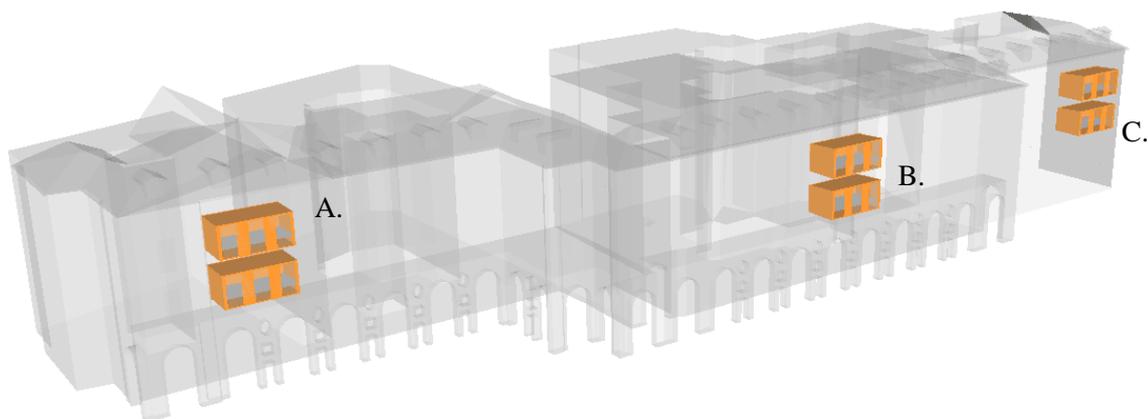


Figure 3: emplacement des appartements de référence sur la façade exposée sud

- A. Dans la grande place
- B. Dans la rue étroite
- C. Dans la petite place

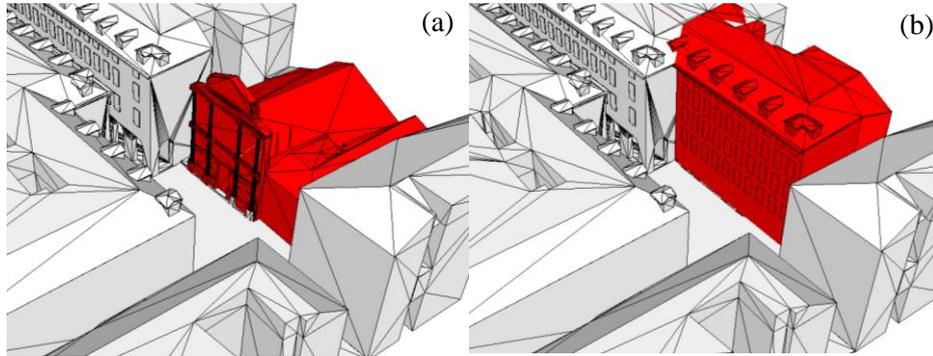


Figure 5: extrait de la maquette numérique: remplacement de la Basilique par une façade
 (a) maquette conforme à la réalité
 (b) maquette modifiée

Le SVF est ensuite calculé sur un ensemble de points d'une surface positionné à une hauteur de 1m qui représente un plan de travail. Les zones où le SVF est supérieur à 3% déterminent la proportion de surface pour laquelle l'apport de lumière naturelle est considéré comme suffisant pour chacun des logements. Situés spatialement, on peut également déterminer la profondeur à partir de laquelle l'apport de lumière naturelle est insuffisant. On appellera cette distance la « **profondeur de lumière pénétrante** » (voir figure 6).

Cette dernière valeur sert ainsi de référence, et instaure un premier critère d'évaluation à **l'échelle domestique**. Discriminant, ce critère permet de fixer un seuil minimum pour lequel l'apport en lumière naturelle est considéré comme insuffisant. Un plan d'aménagement intérieur type est également proposé dans le but d'illustrer le critère au sein d'un agencement typique.

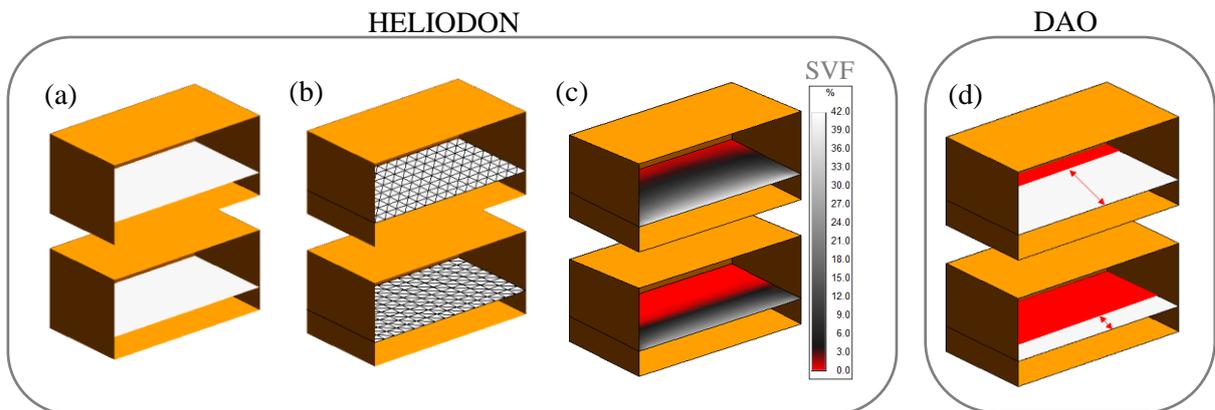


Figure 6: Illustration du processus de calcul du SVF et de la profondeur de lumière pénétrante
 (a) Géométrie de l'appartement (orange), et surface de calcul (blanc)
 (b) Maillage de la surface de calcul située à une hauteur de 1m (noir)
 (c) Valeurs de SVF suivant l'échelle de couleur définie
 (d) Profondeur de lumière pénétrante (m)

2) SVF CALCULE SUR LES FAÇADES

Le SVF est ensuite calculé sur la façade extérieure au niveau des fenêtres des appartements de référence (voir figure 7). La valeur moyenne associée à chacun des logements est comparée aux données calculées précédemment à l'intérieur des appartements. Cela permet d'établir un premier lien entre les valeurs de SVF calculées sur les façades et les différentes « profondeurs de lumière pénétrante ». Ainsi, on peut positionner le seuil minimal de SVF sur la façade correspondant à la profondeur de lumière pénétrante minimale. Les appartements situés dans les zones de façades où le SVF est inférieur à ce seuil sont donc identifiés comme problématiques, et susciteront l'attention des architectes et des urbanistes.

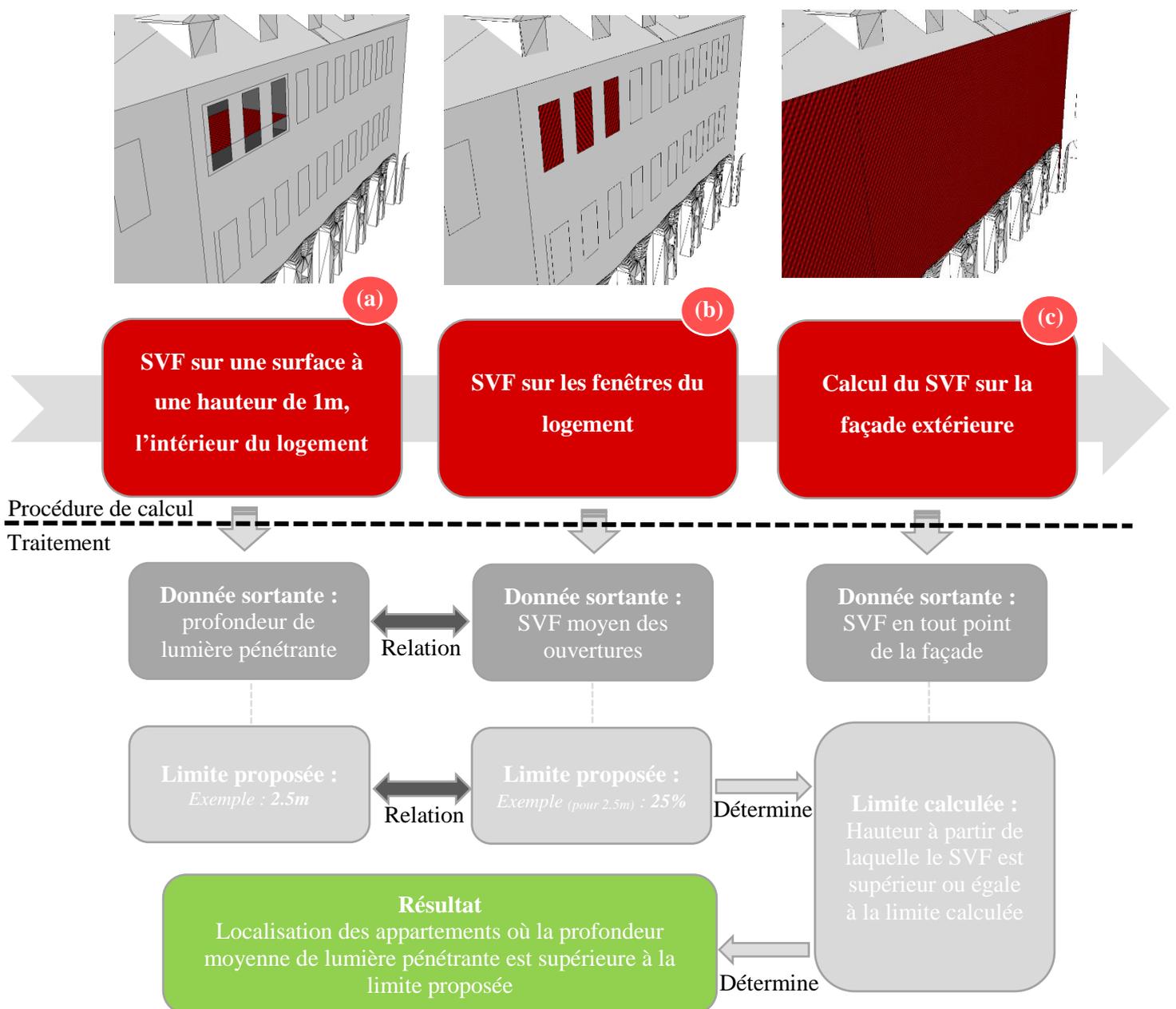


Figure 7: description schématique de la méthodologie proposée. Les différentes surfaces de calculs sont :
 (a) une surface à une hauteur de 1m, à l'intérieur du logement
 (b) les fenêtres du logement, à une hauteur moyenne de 1m
 (c) la façade extérieure entière

RESULTATS

3) CRITERE D'EVALUATION

ECHELLE DOMESTIQUE

La figure 8 présente les résultats du SVF dans le logiciel HELIODON sur le plan de travail des appartements de référence, placés aux 6 différents emplacements dans la rue. L'échelle de valeurs est définie en niveaux de gris pour des valeurs comprises entre 3 et 42%, ce qui illustre la distribution lumineuse au sein de cette surface. De plus, toutes valeurs comprises entre 0 et 3% sont colorisées en rouge, identifiant ainsi les zones où l'on estime que la lumière naturelle n'est pas suffisante.

On retrouve ainsi la géométrie évidente de l'appartement. Les valeurs de SVF les plus élevées se trouvent proche des 3 fenêtres. A l'inverse, les murs opposés affichent les valeurs les plus faibles, et sont donc les zones les plus susceptibles de manquer de lumière naturelle.

L'impact de l'environnement extérieur est clairement souligné. Les appartements situés à des niveaux supérieurs disposent d'un meilleur apport en lumière naturelle, de même que ceux qui donnent sur des espaces dégagés, comme sur les places publiques. A l'inverse, les appartements situés à des niveaux inférieurs et donnant sur des espaces étroits seront les plus sensibles au manque de lumière naturelle.

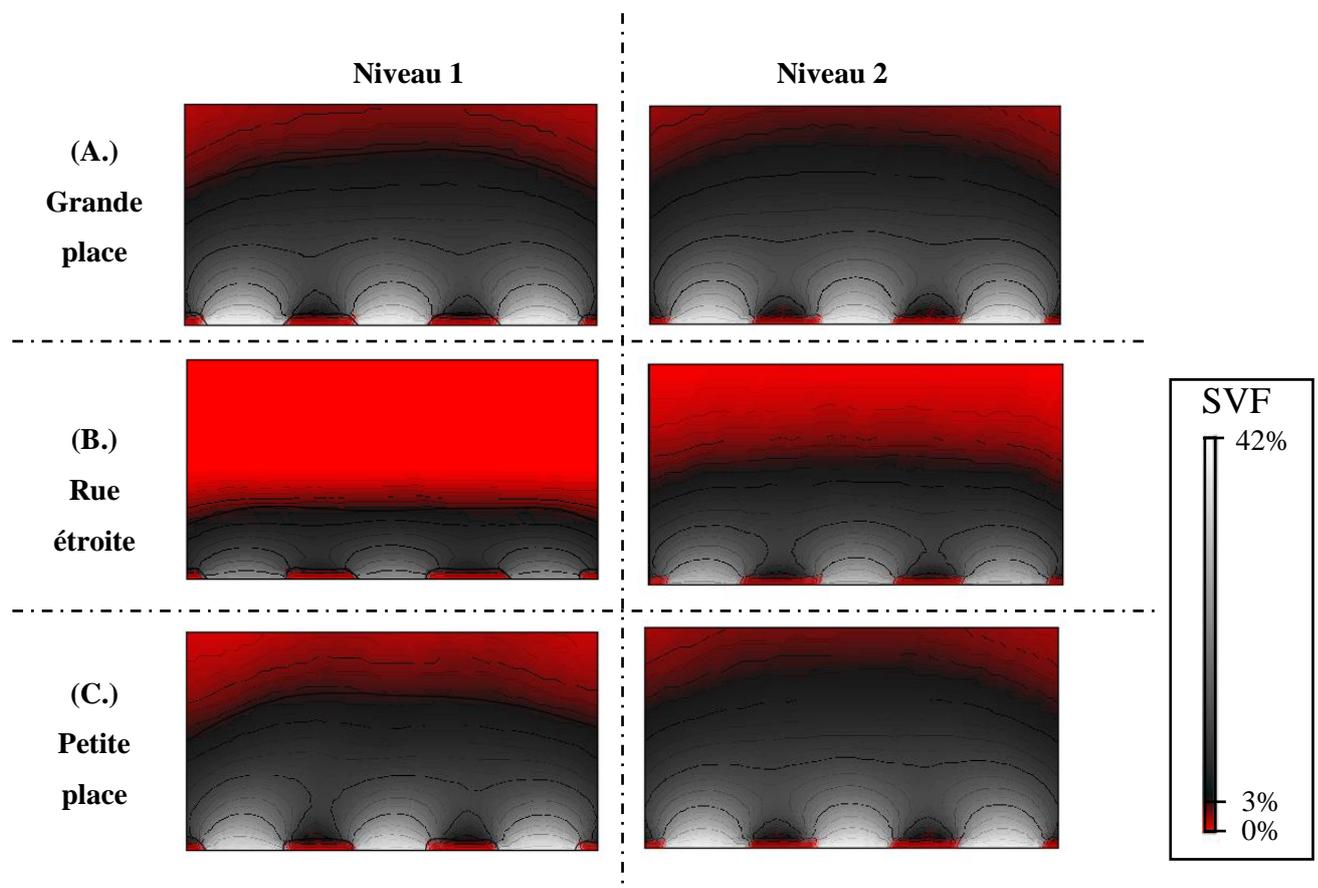


Figure 8: SVF calculés sur un plan de travail à une hauteur de 1m pour chacun des appartements de référence

La figure 9 propose maintenant deux représentations de ces résultats. La première reflète de la proportion de surface de la pièce pour laquelle le SVF est supérieur à 3%. Elle s'inspire des valeurs objectives classiquement définies dans les normes et réglementations, ce qui lui confère une certaine crédibilité.

La deuxième propose une « profondeur de lumière pénétrante » que l'on définit comme la longueur moyenne pour laquelle le SVF est supérieur à 3%. Bien que peu utilisée, cette interprétation s'émancipe de l'établissement de la géométrie intérieur d'appartement. Elle paraît donc d'avantage adaptée à une l'échelle urbaine.

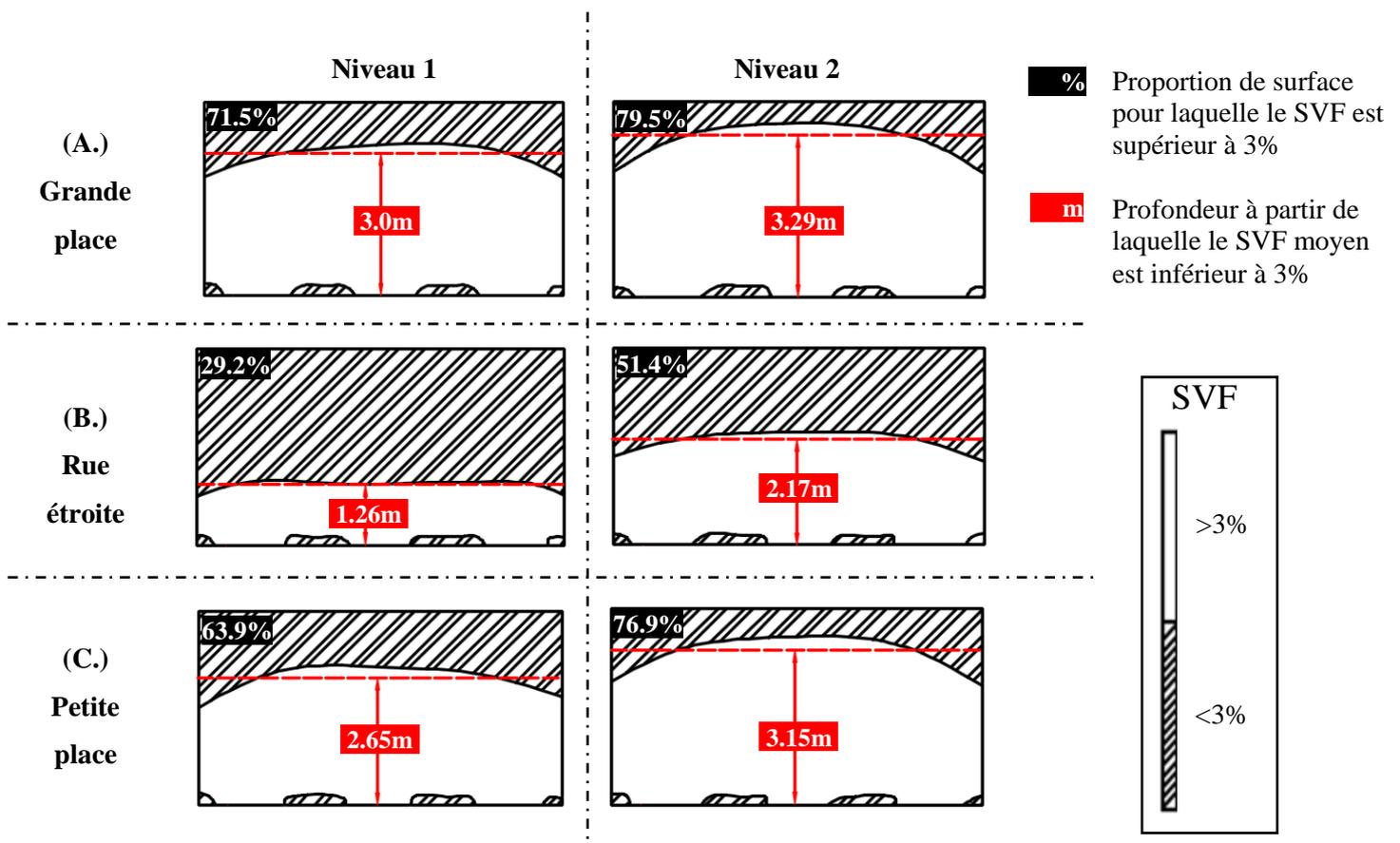


Figure 9: Interprétation des valeurs de SVF calculées sur un plan de travail à une hauteur de 1m pour chacun des appartements de référence

Un agencement intérieur type est présenté sur la (figure 10) pour se projeter dans une situation courante. En y projetant les surfaces dont le SVF est inférieur à 3%, les possibilités d'utilisation en journée par temps couvert des différents plans (table, bar, etc.) sont clairement identifiables, et rendent facilement compte de la situation (figure 11).

Dans les appartements qui donnent sur les grande places, l'usage de l'appartement est tout à fait possible. Les deux tables et le bar sont toujours largement exploitables, que ce soit au premier ou au deuxième niveau. En revanche, les deux appartements situés dans la rue étroite perdent l'usage du bar,

et l'appartement placé au premier niveau ne dispose d'aucune surface où les apports en lumière naturelle sont satisfaisants. Ce logement apparaîtrait même comme indécents.

Cette analyse permet de discrétiser la « profondeur de lumière pénétrante » dans le but de qualifier l'apport de lumière naturelle de « suffisant » ou de « insuffisant ». On se propose ici de fixer une profondeur de lumière pénétrante limite de 2.50m (figure 11). En ce sens, les appartements sensibles au manque de lumière naturelle sont ceux qui se trouvent au niveau de la rue étroite (B.).

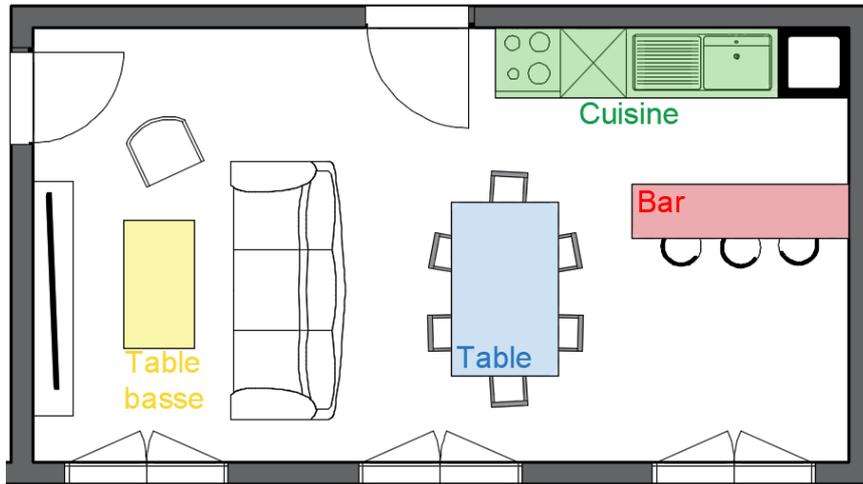


Figure 10: proposition d'agencement intérieur type

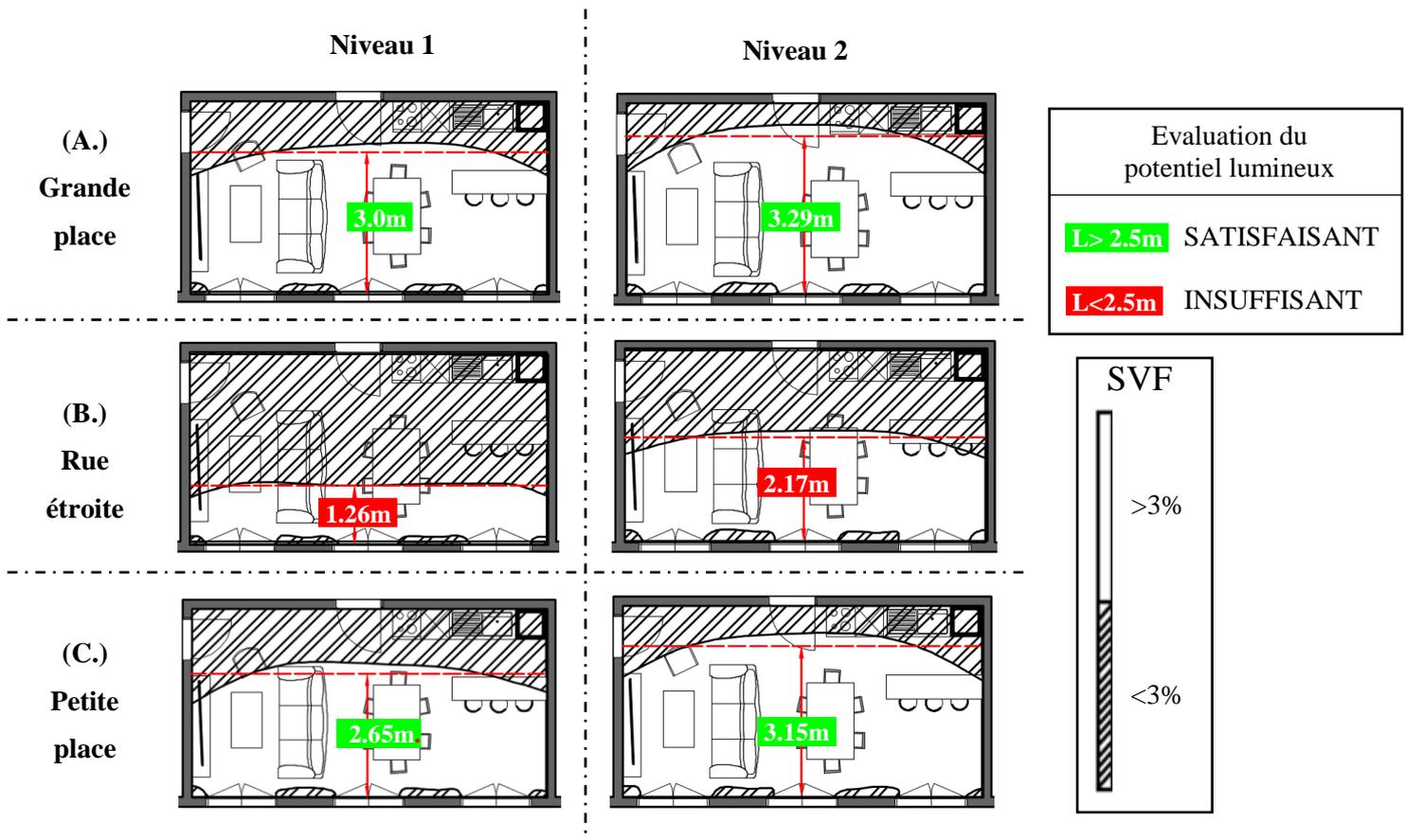


Figure 11: application des valeurs de SVF calculées sur la proposition d'agencement intérieur type

ECHELLE URBAINE

Pour élever le critère précédent à l'échelle urbaine, les valeurs de SVF sont maintenant calculées directement sur les façades extérieures. La figure 12 illustre ces valeurs sur la façade de la rue exposée au sud (valides aussi pour la façade nord, étant donné la symétrie de la place). On voit que les valeurs de SVF sont plus faibles dans les zones faiblement espacées (comme la rue étroite (B.)), et sont plus élevées dans les zones en hauteur.

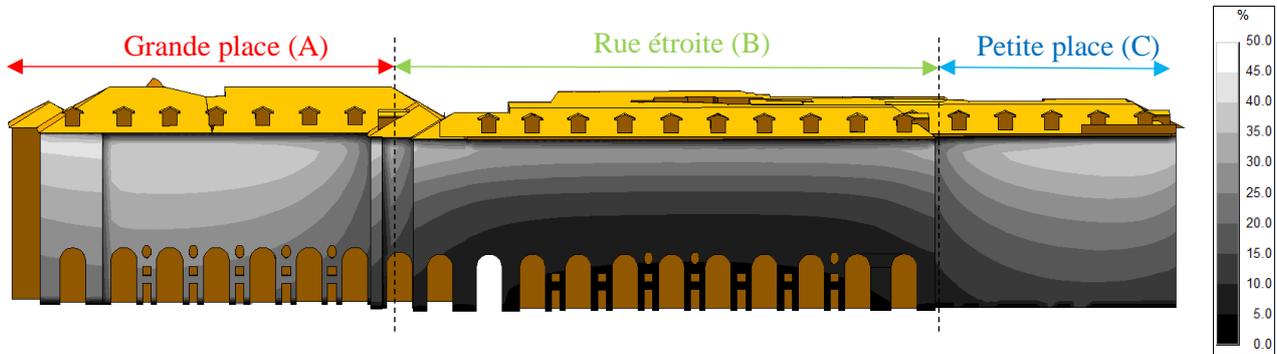


Figure 12: valeurs de SVF calculées sur la façade extérieure exposée au sud

Un lien peut alors être établi entre les valeurs calculées directement sur des surfaces extérieures, et celles précédemment calculées à l'intérieur des logements de référence. La figure 13 présente la valeur moyenne de SVF calculée sur les fenêtres des appartements de référence, et la figure 14 les profondeurs de lumière pénétrantes obtenues aux mêmes appartements.

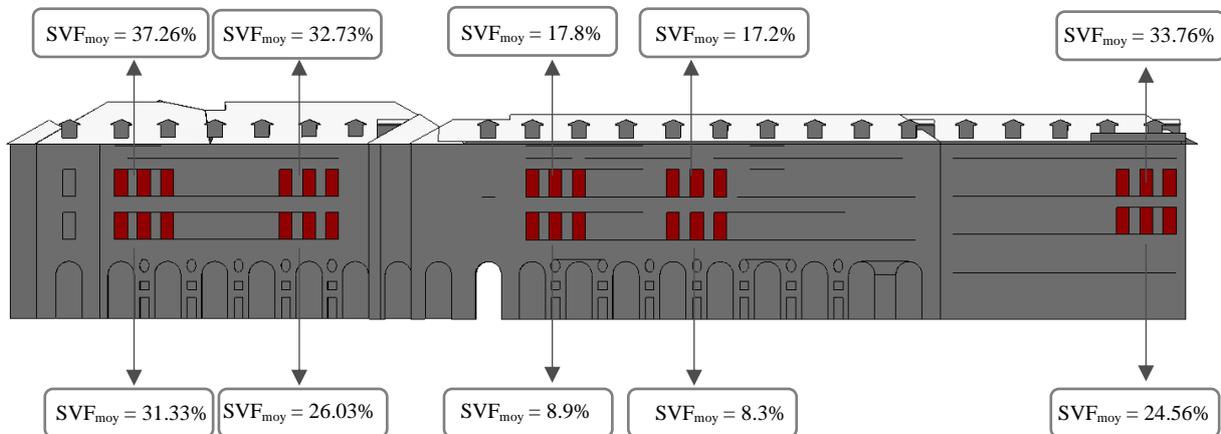


Figure 13 : valeurs de SVF moyennes calculées pour l'ensemble de fenêtres associées à chacun des appartements de référence

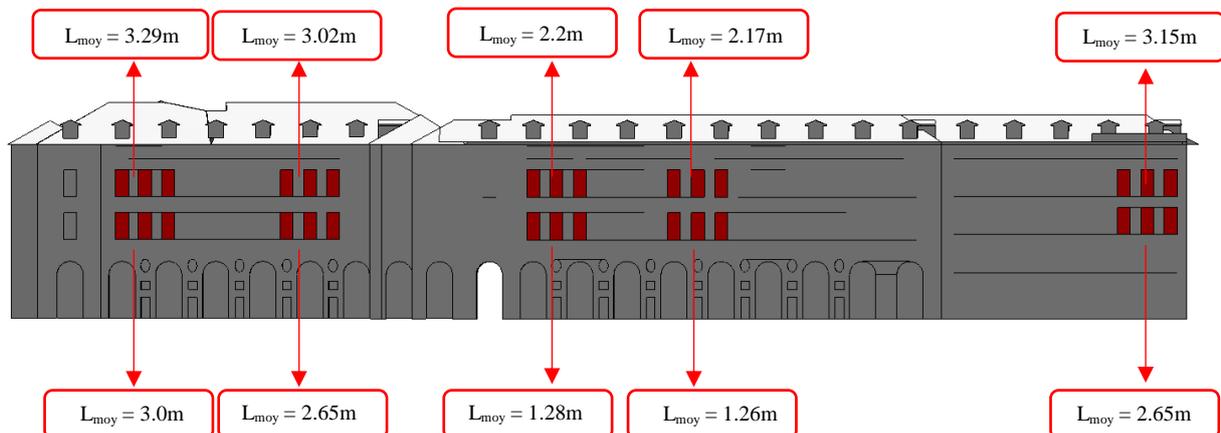


Figure 14 : profondeurs de lumière pénétrante associées à chacun des appartements de référence

La comparaison entre ces valeurs et la « profondeur de lumière pénétrante » associée à chacun des logements révèle une certaine proportionnalité (figure 15). En ce sens, on peut considérer que « la profondeur de lumière pénétrante » peut être estimée directement à partir du SVF calculé sur la façade.

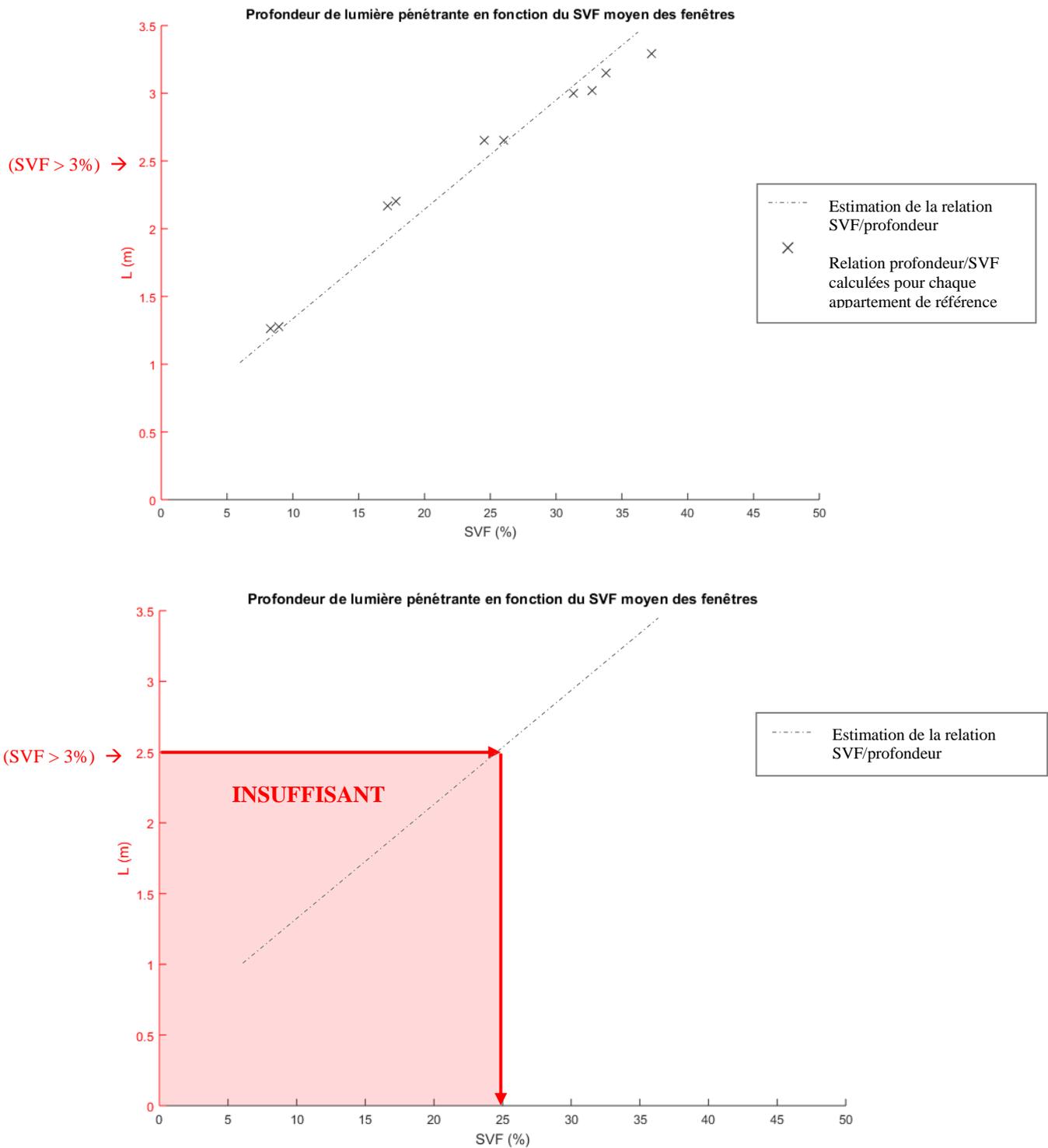


Figure 15: graphiques représentant la profondeur de lumière pénétrante en fonction du SVF calculé au niveau des fenêtres

En reprenant la discrétisation précédente, on peut proposer l'idée qu'un appartement disposera d'une profondeur de lumière pénétrante satisfaisante ($> 2.5m$) s'il se situe dans une zone où la valeur de SVF calculée sur la façade est supérieure à 25% (Figure 16). Les 6 appartements de référence peuvent y être situés. On retrouve ainsi les appartements de la rue étroite où les apports en lumière naturelle sont considérés comme insuffisants (B), et ceux sur les deux premiers niveaux des places considérés comme satisfaisants (A) & (B).

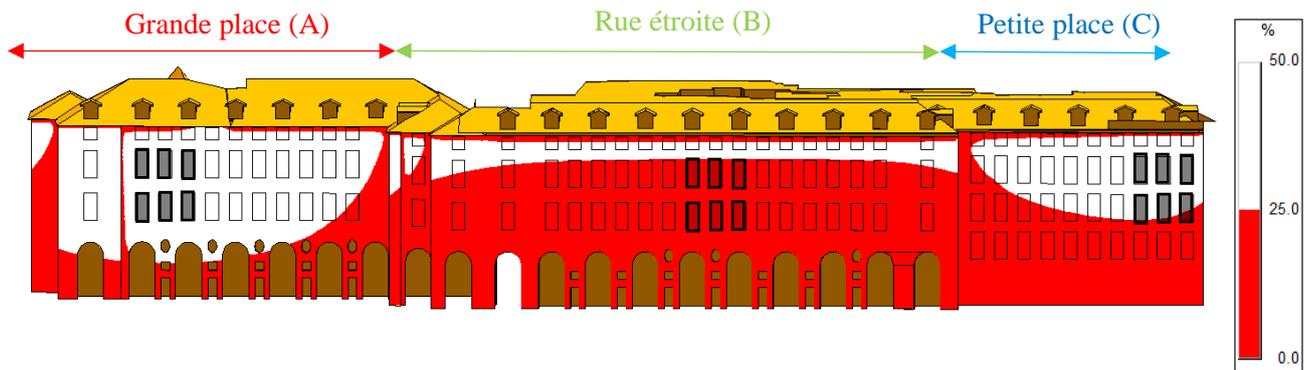


Figure 16: valeurs de SVF calculées sur la façade extérieure exposée au sud, discriminée pour 25%
 (a) Appartements de référence où les apports en lumière naturelle sont satisfaisants
 (b) Appartements de référence où les apports en lumière naturelle sont insuffisants

Cette dernière illustration introduit un indicateur supplémentaire à l'échelle urbaine, et correspond à la hauteur à partir de laquelle la profondeur de lumière pénétrante n'est plus suffisante (Figure 17). Par exemple, la hauteur qui correspond à la rue étroite est de 16m (a), ce qui signifie que les niveaux 1 et 2 disposeront d'une profondeur de lumière pénétrante insuffisante.

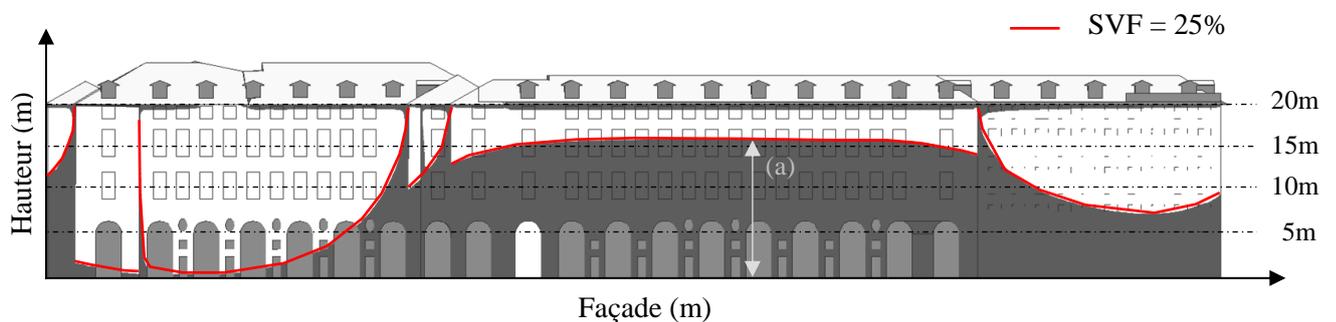


Figure 17: représentation graphique de la hauteur correspondant au SVF = 25%

Cette information peut ainsi être illustrée sur une cartographie urbaine en deux dimensions, qui peut être étendue à tout un quartier, ou une ville (Figure 18). Les emplacements des appartements soumis au manque de lumière naturelle apparaissent clairement sur cette cartographie.

- (a) Dans la rue étroite, les appartements identifiés se situent à une hauteur inférieure à 16m. Ce qui correspond au RDC, R+1, et au R+2.
- (b) Sur la grande place, des appartements situés dans une zone étroite sont identifiés à une hauteur d'environ 10m. Ce qui correspond au RDC et au R+1.

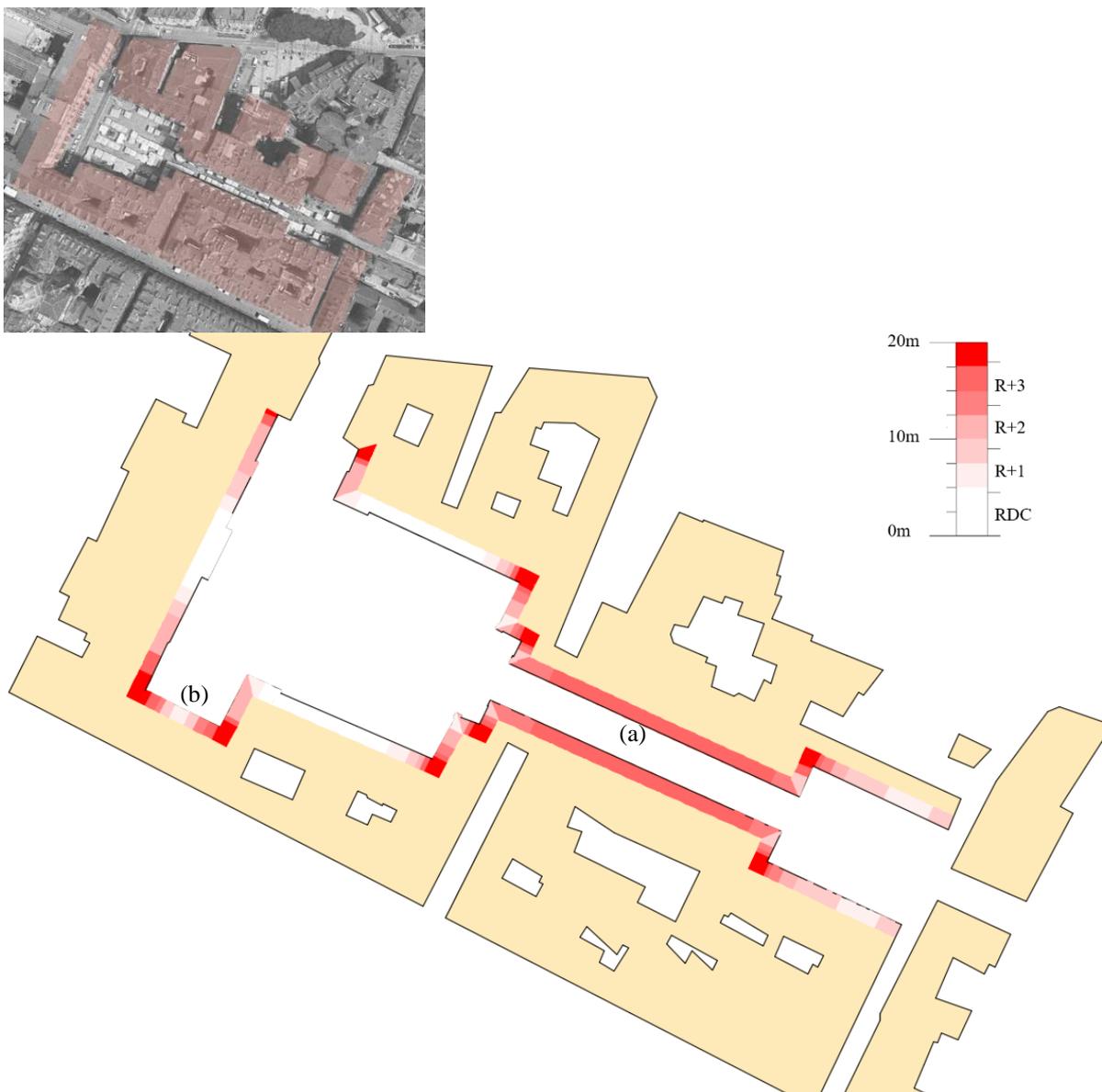


Figure 18: Hauteur d'étage à partir de laquelle l'évaluation du potentiel lumineux des appartements est considérée comme insuffisante

DISCUSSIONS

Le cas étude présenté précédemment est uniquement issu d'un modèle géométrique. Les limites de cette procédure sont posées par la richesse de l'environnement urbain, dont certains détails ont une importance significative sur l'évaluation du potentiel lumineux.

Ce rapport est réalisé dans le centre-ville historique de Turin, où l'architecture respecte une certaine uniformité (Figure 19). La répartition des fenêtres dans l'espace y est homogène, bien que leur taille puisse varier entre les niveaux. En revanche, les avancées de toiture peuvent varier d'un bâtiment à l'autre, et ont un impact sur les apports en lumière naturelle des appartements sous-jacents.

On se propose dans cette dernière partie de modifier certains éléments de la maquette numériques pour souligner l'influence de l'environnement urbain, indépendamment de sa typologie.



Figure 19 : images issues de www.google.fr/maps des quartiers proches de la Piazza Palazzo di Città

INFLUENCE DE LA TAILLE DES OUVERTURES

Pour étudier l'impact de la taille des fenêtres sur les apports en lumière naturelle, on se propose de recalculer la profondeur de lumière pénétrante dans des appartements dont la géométrie des ouvertures a été modifiée (Figure 20). On compare ensuite ces résultats obtenus dans les appartements de références au premier niveau (a) avec ceux dont l'ouverture maximale (b), et ceux aux fenêtres réduites (c) (Figure 21).

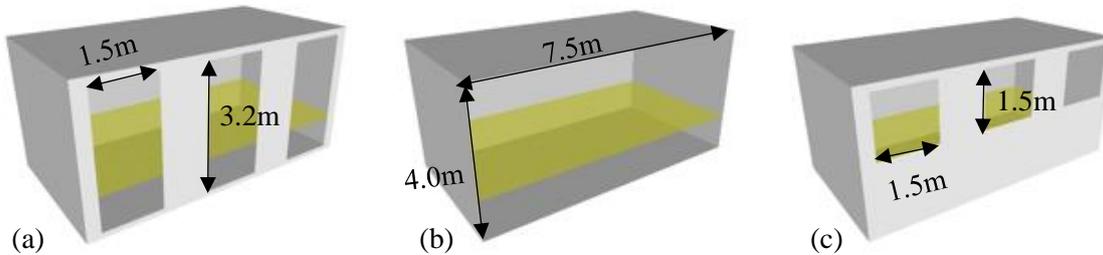


Figure 20: modification de la géométrie de l'appartement de référence (a)
 (b) ouvertures maximales
 (c) taille des fenêtres réduites

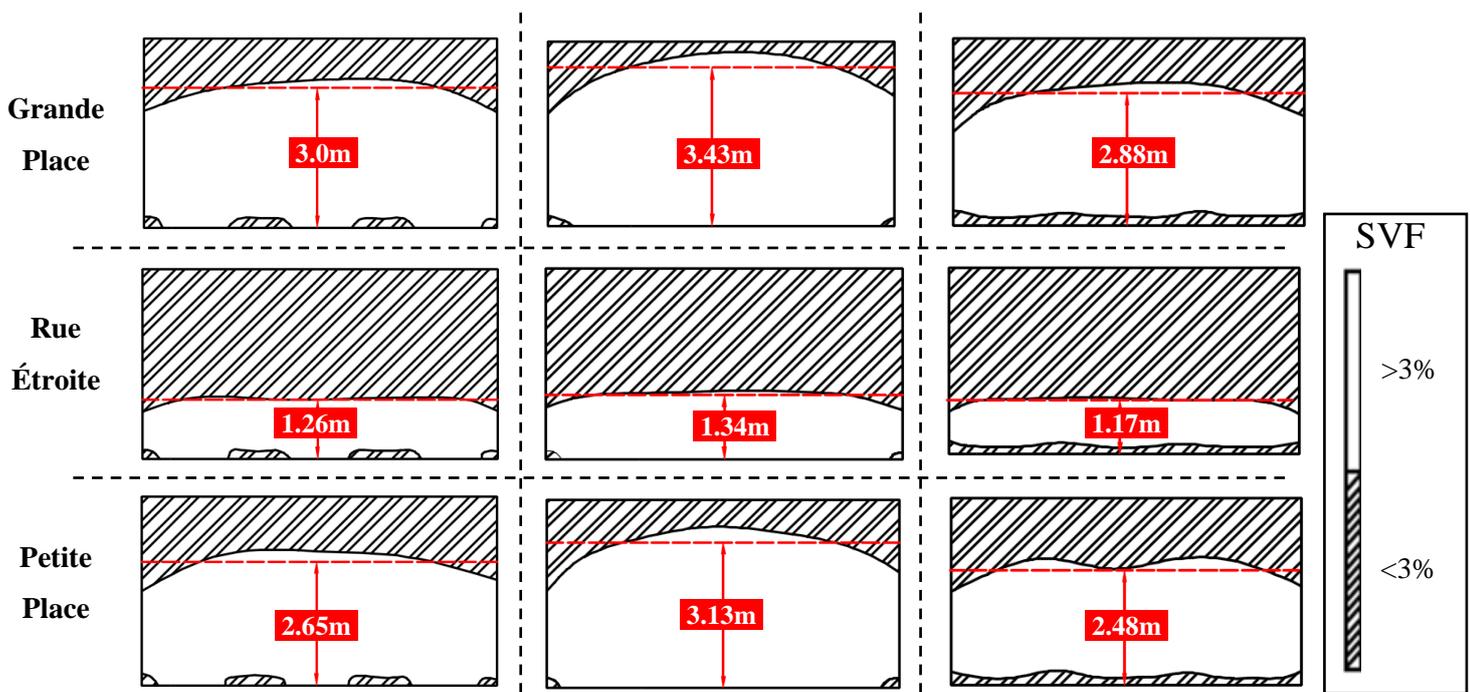


Figure 21: Comparaison des apports lumineux de 3 appartements issus de la maquette numérique urbaine, en considérant 3 tailles de fenêtres différentes

Les apports lumineux modèles modifiés sont est du même ordre de grandeur que les appartements de référence issus de la maquette numérique urbaine. La profondeur pénétrante y est généralement inférieure de 7% dans les appartements dont la taille des fenêtres a été réduite, et est supérieure d'environ 6 à 15% pour les appartements dont l'ouverture est maximale. Une différence au niveau du mur du côté de la façade s'identifie au masque occasionné par l'allège des différentes fenêtres.

INFLUENCE DE L'AVANCEE DE TOITURE

Pour souligner l'influence de l'avancée de toiture sur les apports en lumière naturelle, on se propose de modifier la maquette numérique en positionnant des fenêtres de mêmes dimensions à 3 différentes hauteurs : niveau 1 (a), niveau 2 (b), niveau 3 (c) (Figure 22). Les apports en lumière naturelle y seront comparés dans la grande place (Figure 23) et dans la rue étroite (Figure 24).

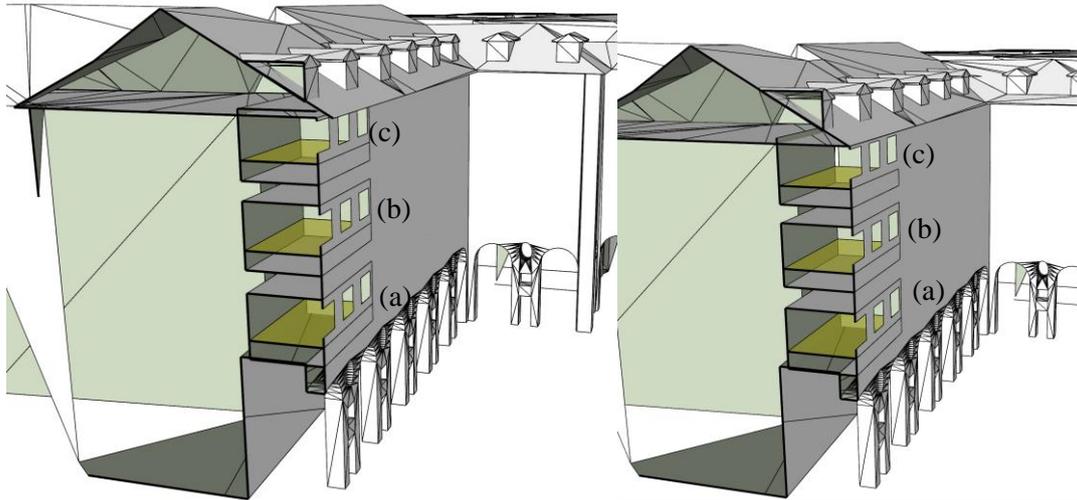


Figure 22: maquette numérique avec avancée de toiture de 40cm (à gauche) et sans avancée de toiture (à droite)

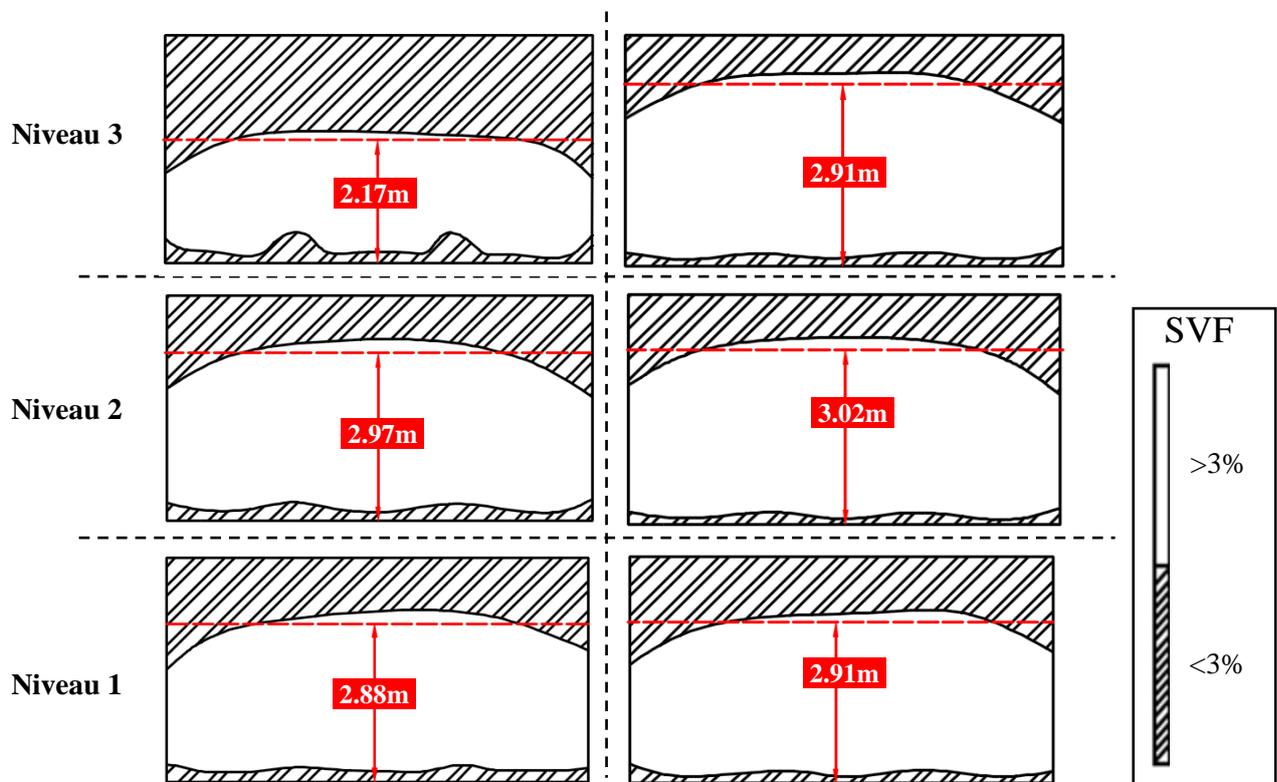


Figure 23: Comparaison des apports lumineux de 3 appartements issus de la maquette numérique urbaine situés dans la **grande place**, avec une avancée de toiture de 40cm (à gauche) et sans avancée de toiture (à droite)

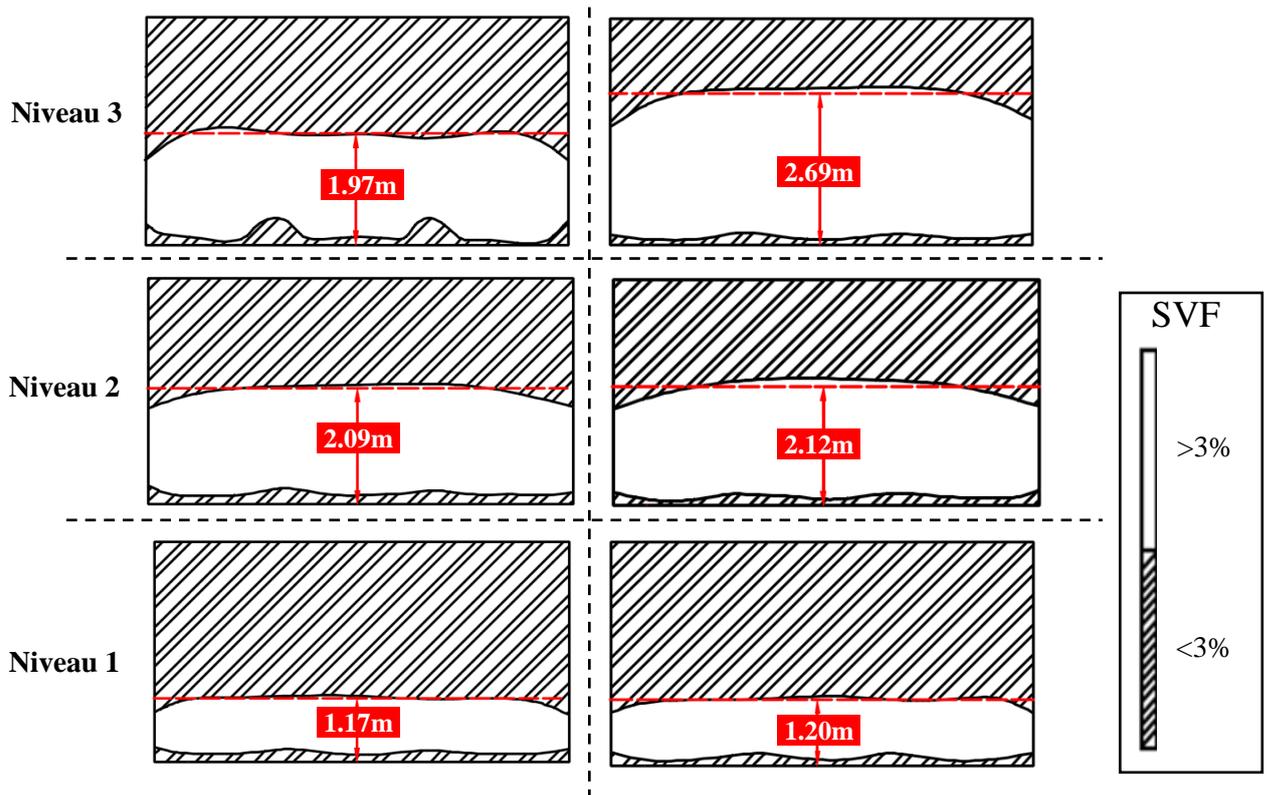


Figure 24: Comparaison des apports lumineux de 3 appartements issus de la maquette numérique urbaine situés dans la **rue étroite**, avec une avancée de toiture de 40cm (à gauche) et sans avancée de toiture (à droite)

L'avancée de toiture n'as pas d'impact sur les apports lumineux des appartements situés au niveaux 1 (a) et 2 (b) de la grande place et de la rue étroite. Les différences sont de l'ordre de 2% au maximum.

En revanche, elle a une influence significative sur les appartements du dernier niveau. Les ouvertures sont très proches de l'avancée de toiture de 40cm, ce qui engendre des écarts d'environ 30% avec un cas sans avancées de toit.

CONCLUSION

Dans ce rapport, le SVF est proposé comme indicateur d'évaluation du potentiel lumineux d'appartements à l'échelle urbaine. Son utilisation est illustrée par un cas d'étude à Turin.

Il permet d'abord d'établir une première quantification des apports en lumière naturelle pour un espace intérieur à partir d'une maquette numérique urbaine. L'influence de la typologie des bâtiments proches est soulignée, démontrant que les appartements situés dans des rues étroites sont les plus susceptibles de manquer de lumière naturelle. De même, les appartements situés dans les premiers niveaux sont plus sensibles au manque de lumière naturelle. Un critère discriminant est proposé, correspondant à une profondeur de lumière pénétrante minimale de 2.5m pour qualifier les apports en lumière naturelle de « satisfaisants ».

Un lien entre la qualification précédente et les valeurs de SVF calculées en façade est approché, permettant d'émanciper la qualification de la définition de la géométrie intérieure propre à chacun des logements. Une valeur de SVF égale à 25% correspond à une profondeur de lumière pénétrante de 2.5m. Cette valeur est proportionnelle à la hauteur, ce qui permet d'établir la hauteur de façade pour laquelle la profondeur de lumière pénétrante est inférieur au seuil fixé précédemment. Cette information peut alors être illustrée sur une cartographie en deux dimensions, pour permettre aux architectes et aux urbanistes de cibler les rues sensibles au manque de lumière naturelle.

Dans la discussion, l'importance de certains détails urbains a été soulignée. Des avancées de toiture de seulement 40cm ont un impact majeur sur la profondeur de lumière pénétrante des appartements au dernier niveau. Ainsi, des détails supplémentaires (comme des balcons, casquettes, protections solaires, etc.) ne sont surtout pas à négliger. En revanche, la taille des fenêtres a un faible impact sur la profondeur de lumière pénétrante, ce qui permet de modéliser rapidement une façade dont les fenêtres sont très différentes.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2017. « L'éclairage artificiel ». *ADEME*. Consulté 16 juillet 2020 (<https://www.ademe.fr/expertises/batiment/passer-a-laction/elements-dequipement/leclairage-artificiel>).
- ADEME. s. d. « La réglementation thermique ». *ADEME*. Consulté 17 juillet 2020 (<https://www.ademe.fr/expertises/batiment/elements-contexte/politiques-vigueur/reglementation-thermique>).
- AFNOR. 2018. « NF EN 17037 - Lumière naturelle dans les bâtiments ».
- Beckers, B., et L. Masset 2006. Heliodon 2. Software and User Guide. *Disponible à : www.heliodon.net*
- Beckers, B., et D. Rodríguez. 2009. « Helping Architects to Design Their Personal Daylight ». 5(7):11.
- Building Research Establishment. s. d. « BREEAM: The BRE Environmental Assessment Method ». Consulté 13 juillet 2020 (<https://www.breeam.com>).
- Capeluto, I. G. 2003. « The Influence of the Urban Environment on the Availability of Daylighting in Office Buildings in Israel ». *Building and Environment* 38(5):745-52.
- DIHAL, Délégation Interministérielle à l'Hébergement et à l'Accès au Logement. 2013. « Lutter contre l'habitat indigne: Les locaux impropres par nature à l'habitation ».
- Garcia-Nevaldo, E. et al. 2015 « Characterization of solar access in Mediterranean cities: Oriented Sky Factor », à : *PLEA 2015 – 31st Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Bolonia, Italy, pp. 1–7.
- GBCA. 2020. « Home | Green Building Council of Australia ».
- GOOGLEMAPS. 2020. « Google Maps ». *Google Maps*. Consulté 11 août 2020 (<https://www.google.fr/maps/@44.1635695,7.0824454,10z?hl=fr>).
- Gröger, Gerhard, et Lutz Plümer. 2012. « CityGML – Interoperable Semantic 3D City Models ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 71:12-33.
- Guillemin, Amédée. 1879. *Petite encyclopédie populaire, par Amédée Guillemin. III. La Lumière et les couleurs... 3e éd.* Hachette.
- HQE. s. d. « Certifications – Alliance HQE-GBC ». Consulté 5 août 2020 (<http://www.hqegbc.org/batiments/certifications/>).
- IES. 2020. « IES Spatial Daylight Autonomy (SDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE) – Illuminating Engineering Society ».
- Linney, AS. 2008. « Maximum Luminances and Luminance Ratios and ... »
- Mardaljevic, J.. 1999. « Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients ».
- Mardaljevic, J, L. Hescong, et E. Lee. 2009. « Daylight metrics and energy savings ». *Lighting Research & Technology - LIGHTING RES TECHNOL* 41:261-83.

- MEDDE, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. 2013. « Méthode de calcul Th-BCE 2012 - développée par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) ».
- Moon, P., et D. Spencer. 1942. « Illumination for a non-uniform sky ». *Transactions of the Illumination Engineering Society* 37.
- Reinhart, C. F., et O. Walkenhorst. 2001. « Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds ». *Energy and Buildings* 33(7):683-97.
- The U.S. Green Building Council. s. d. « LEED: Leadership in Energy and Environmental ». Consulté 13 juillet 2020 (<https://www.usgbc.org/leed>).
- Tregenza, P., et J. Mardaljevic. 2018. « Daylighting buildings: Standards and the needs of the designer ». *Lighting Research & Technology* 50:63-79.
- USGBC. s. d. « Daylight | U.S. Green Building Council ». Consulté 18 août 2020 (<https://www.usgbc.org/credits/healthcare/v4-draft/eqc-0>).
- Ward, E. et G. Shakespeare. 1998. « Rendering with radiance: the art and science of lighting visualization ». *Morgan Kaufman*.
- Webb, A. R. 2006. « Considerations for Lighting in the Built Environment: Non-Visual Effects of Light ». *Energy and Buildings* 38(7):721-27.
- Wilcox, S., et W. Marion. 2008. « Users Manual for TMY3 Data Sets ». *Technical Report* 58.