

#### Université de Lille 1 – Sciences et Technologies Ecole doctorale SESAM « Sciences Economiques, Sociales, de l'Aménagement et du Management » Laboratoire TVES, EA 4477, UFR de Géographie et Aménagement

## MODELISATION DES ECHANGES RADIATIFS A L'ECHELLE URBAINE POUR UN URBANISME BIOCLIMATIQUE

## Thèse de doctorat Présentée et soutenue publiquement par Raphaël NAHON

Pour l'obtention du grade de docteur en Aménagement de l'espace et Urbanisme Le 30 novembre 2017 à l'Université de Lille 1

MEMBRES DU JURY :

Jérôme Henri Kämpf, Professeur à la HEIA (Haute école d'ingénierie et d'architecture) de Fribourg, Suisse – Rapporteur Frédéric Cherqui, Enseignant-Chercheur à l'Université Lyon 1 – Rapporteur Sigrid Reiter, Professeur à l'Université de Liège, Belgique Morgane Colombert, Enseignant-Chercheur à l'EIVP (Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris) Marc Dumont, Professeur à l'Université de Lille 1

**ENCADREMENT:** 

Olivier Blanpain, Professeur à l'Université de Lille 1 – Directeur de thèse Benoit Beckers, Professeur à l'UPPA (Université de Pau et des Pays de l'Adour) – Co-Directeur de thèse Mohammed Boumahdi, Président Directeur Général de la société CDI Technologies – Encadrant scientifique et technique au sein de l'entreprise d'accueil

Ces travaux ont été intégralement financés par la société **CDI Technologies**, éditeur de logiciels pour les métiers de l'aménagement, dans le cadre d'un Contrat à Durée Indéterminée de Chantier associé à la thèse



479 Av. Jean Jaurès, 77190 Dammarie Les Lys 01 64 79 15 95 / info@cditech.fr / www.cditech.fr

#### REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu Mohammed Boumahdi, qui m'a donné l'opportunité de réaliser cette thèse sous sa direction au sein de l'entreprise CDI Technologies. Vous avez été l'un des premiers à croire en notre projet et m'avez donné les moyens de le mettre en œuvre ; pour la confiance et la liberté que vous m'avez accordées, un grand merci à vous.

Je remercie Olivier Blanpain, qui est devenu avec le temps bien plus que mon directeur de thèse. Ton esprit critique m'a remis les pieds sur terre quand je prenais des directions trop nébuleuses. Je garde un attrait prononcé pour les nuages, qui ont de fait une place importante dans ces travaux, mais espère avoir su profiter de tes conseils pour donner un sens plus concret à ces travaux. Merci pour ces heures à discuter sur un coin de bureau tant d'aménagement urbain que de pierres d'aiguisage, de tourbe et de maltage, ou encore de poudre noire.

Je remercie particulièrement Benoit Beckers, sans qui je ne me serais probablement jamais lancé dans ces travaux. J'ai pris goût à la modélisation numérique en projetant l'ombre d'un fou sur un échiquier sous le soleil barcelonais... Ton discours a bouleversé ma perception des villes, du ciel et des couleurs ; tu m'as ouvert les portes d'un monde nouveau et j'aurais bien du mal à t'exprimer ici toute ma gratitude.

Merci aux partenaires du projet SERVEAU ; Alain Bornarel et Alexandre Deneuville du bureau d'études TRIBU ; Carole Delattre, Jean-François Morel et Vincent Dumas de MA-GEO ; Sami Lallahem et Dounia Lahlou d'Ixsane ; Morgane Colombert de l'EIVP ; Cedissia de Chastenet de la Mairie de Paris. Votre expertise a guidé mes pas ; nos nombreuses réunions m'ont permis de préciser ma problématique et de confronter nos travaux de recherches à la réalité des projets d'aménagement urbain ; merci à vous.

Merci à toute l'équipe de CDI Technologies pour avoir partagé mon quotidien ces dernières années. Nathalie, Marie-Sophie, Kawtar, Jean-Pierre, Sylvain, Vincent et Mohammed, vous me manquerez dans cette nouvelle vie d'universitaire.

Un grand merci à Thibault Vermeulen et Luis Merino, qui m'ont précédé au laboratoire AVENUES de l'Université de Technologie de Compiègne et dont les travaux ont servi de bases aux miens. Il ne reste dans mon code plus grand-chose du votre, si humblement baptisé 'FiatLux' ; j'en ai toutefois conservé le nom et ai une petite pensée pour vous chaque fois que je l'exécute (je ne les compte plus...).

Merci à toute l'équipe du laboratoire TVES de l'Université de Lille1 pour leur accueil et leur soutien.

Merci à Eduardo Fernández et Gonzalo Besuievsky, co-auteurs de mon premier article présenté en conférence, pour leur soutien et leur bonne humeur.

Merci à Elena García Nevado de l'Université polytechnique de Catalogne (en catalan : Universitat Politècnica de Catalunya) qui a réalisé les thermographies d'une rue du petit Bayonne qui illustre le dernier chapitre de cette thèse.

Merci à Silvère Tribout qui a gentiment accepté de relire mes travaux et dont les remarques m'ont (je l'espère) permis d'enrichir notamment le premier chapitre de cette thèse.

Enfin, à ceux que j'ai oubliés ainsi qu'à vous qui prenez la peine de me lire, merci !

#### PREAMBULE

Cette thèse est intégralement financée par l'entreprise CDI Technologies, éditeur de logiciels à destination des acteurs de l'aménagement urbain, dans le cadre d'un contrat à durée indéterminée de chantier (CDIC). Mon embauche traduit la volonté de la société de compléter sa gamme de produits par un outil permettant de comparer différents scénarios d'aménagement sur un critère énergétique. Mes tâches au sein de l'entreprise sont partagées entre mon activité de recherche et de chef de produit ; je suis à ce titre responsable du développement des outils *KéaPolaris*<sup>1</sup>, de topographie et de conception de projets VRD, et *SaneCity*<sup>2</sup>, pour l'optimisation énergétique des projets d'aménagements urbains.

Dans le cadre de mon activité de recherche, je me suis vu confier la direction du projet *SERVEAU*<sup>3</sup> (*Simulation Evaluation et Réduction de la Vulnérabilité Energétique de l'Aménagement Urbain*, 2011-2015), issu du 11<sup>ième</sup> appel à projets FUI (Fonds Unique Interministériel) et réunissant des partenaires académiques et industriels. Le projet a débuté en Mai 2011 été livré en Février 2015. Il compte sept tâches: (1) Explicitation et synthèses des modèles existants ; (2) Définition des échelles ; (3) Définition de la base de données ; (4) Modèles énergétiques ; (5) Implémentation ; (6) Réalisation de l'interface ; (7) Expérimentation / Validation. Cette thèse a débuté en septembre 2013, au lancement de la tâche 3.

L'ambition principale du projet *SERVEAU* était de mettre à disposition des acteurs de la ville un outil d'aide à la décision capable d'évaluer le bilan énergétique d'un projet urbain sur l'ensemble de son cycle de vie ; il a débouché sur la réalisation du logiciel *SaneCity* commercialisé par CDI Technologies. Les travaux présentés dans cette thèse sont le résultat de mon activité de recherche en parallèle du projet *SERVEAU* et se focalisent sur l'impact de l'exposition à la voûte céleste sur le "bioclimatisme" d'un projet d'aménagement urbain : sur l'accès à la lumière naturelle, l'efficacité énergétique des bâtiments et le confort thermique des espaces extérieurs.

Cette thèse se structure en trois grandes parties. L'architecture retenue pour la base de données du logiciel *SaneCity* ainsi que les liens entre les données disponibles dans les premières étapes de la conception et celles nécessaires à l'analyse du bioclimatisme du projet sont présentés dans la première. La deuxième porte sur la caractérisation de l'accès à la lumière naturelle à partir de cette base de données, et s'appuie notamment sur l'analyse de la distribution de la lumière sur la voûte céleste et de son impact sur l'éclairage naturel dans un intérieur. La troisième et dernière partie se focalise sur l'impact de l'exposition à la voûte céleste sur l'efficacité énergétique des bâtiments et le confort thermique des espaces extérieurs.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup><u>www.cditech.fr/index.php/produits/keapolaris/</u>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup><u>www.cditech.fr/index.php/produits/sanecity/</u>

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>www.ixsane.com/index.php/fr/recherche-innovation/serveau.html

#### Resume

Un projet d'aménagement urbain se structure suivant trois grands niveaux de définition : le plan guide, le plan masse et le plan d'îlots. Les éléments du programme urbain sont répartis en deux dimensions sur le périmètre du projet dans le plan guide ; la géométrie extérieure, notamment les volumes englobants des différents bâtiments, est définie dans le plan masse ; les détails architecturaux, tels que le cloisonnement intérieur, la forme et la position des fenêtres ou encore le type de protections solaires, sont introduits dans le plan d'îlots. Une première version du plan masse est proposée dès la phase concours. Les données disponibles à cette étape ne permettent ni l'analyse du comportement thermique des bâtiments, ni la caractérisation de l'accès à la lumière naturelle en leur intérieur. La conduite d'entretiens auprès de professionnels de l'industrie du BTP dans le cadre du projet SERVEAU a révélé qu'un certain nombre de variables de conception sont conditionnées, pour une zone climatique donnée, par (1) l'usage (logement, bureau, etc.), (2) le standard de performance (Label, réglementaire, etc.) et (3) le type de structure (béton, ossature métallique, etc.). Il est donc possible d'émettre sur base de ces trois paramètres des hypothèses sur les attributs sémantiques des bâtiments du projet. Nous récapitulons ces hypothèses dans une base de données (BDD) dont nous présentons l'architecture. Le recours à cette BDD permet au Maître d'Œuvre Urbain (MOE-U) d'atteindre un niveau de détail (LoD) permettant une meilleure prise en compte du bioclimatisme du projet dès le plan masse. Il permet notamment de construire l'ensemble des données nécessaires à la Simulation Thermique Dynamique (STD) des bâtiments et d'estimer le facteur de vue de l'extérieur depuis les zones d'intérêts au regard de l'éclairage naturel.

La caractérisation des conditions d'éclairage naturel dans un intérieur repose sur la modélisation de l'éclairement sur le plan de travail au cours d'une année et dépend notamment de la distribution de la lumière sur la voûte céleste. Si l'on néglige l'impact des réflexions intérieures, l'éclairement sur un plan horizontal dépend de la luminance et du facteur de vue des sources lumineuses extérieures. Pour un facteur de vue donné, il est donc possible d'estimer les *luminances* minimale  $L_{min}$  et maximale  $L_{max}$  d'une source lumineuse, au-delà de laquelle elle entraine un éclairement respectivement suffisant et susceptible de provoquer un éblouissement. Nous introduisons sur base de ces constats les concepts de luminance L d'une source permet respectivement un éclairement suffisant ( $L > L_{min}$ ), utile ( $L_{max} > L > L_{min}$ ) et excessif ( $L > L_{max}$ ). Nous proposons de recourir à ces indicateurs afin d'évaluer les sources de lumières extérieures et ainsi de déterminer les directions à privilégier pour favoriser l'accès à la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments du projet.

Le rayonnement infrarouge, le flux énergétique *de grandes longueurs d'ondes* (GLO) émis par la voûte céleste et les surfaces extérieures, a un impact majeur sur le bilan thermique des bâtiments et les conditions de confort thermique extérieur. Le *rayonnement atmosphérique*, le flux GLO émis par la voûte céleste, est communément considéré *isotrope* : son intensité est supposée constante quelle que soit la direction considérée. Elle varie en réalité avec la hauteur zénithale, suivant un gradient plus ou moins important en fonction du couvert nuageux. Nous proposons un modèle permettant d'estimer la distribution de la radiance GLO de la voûte céleste au cours d'une année afin d'identifier les directions à privilégier pour favoriser le confort thermique extérieur et limiter les besoins en chauffage et en rafraîchissement des bâtiments. Nous montrons que la prise en compte de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique suivant ce modèle entraine en milieu dégagé : (1) une différence de 91 kWh/m<sup>2</sup> sur le rayonnement GLO absorbée par une paroi verticale à Paris, soit respectivement 25% et 75% de l'énergie CLO absorbée par une façade orientée Sud et Nord ; (2) des différences atteignant plus de 5°C sur la température radiante moyenne, composante fondamentale du confort thermique extérieur.

Dans un contexte urbain, le rayonnement atmosphérique est nettement inférieur au rayonnement infrarouge émis par les surfaces extérieures. Ces dernières sont communément supposées à la température de l'air, avec éventuellement une distinction entre le sol, les murs exposés au soleil et à l'ombre. La nature des matériaux et leur exposition à la voûte céleste ne sont pas prises en compte. L'ensemble des attributs physiques nécessaires à la *simulation thermique dynamique* (STD) des bâtiments est défini dans la BDD proposée dans le premier chapitre de cette thèse. Il est donc possible d'estimer dès l'étape du plan masse les températures de surfaces des parois extérieures. Plusieurs modèles reposant sur l'analogie thermique électrique permettent la modélisation du comportement thermique dynamique des bâtiments à l'échelle urbaine. Nous proposons une réflexion sur ces modèles, notamment sur leur capacité à s'appuyer sur un maillage similaire à celui retenu pour le calcul de l'ensoleillement extérieur afin d'obtenir des températures de surfaces différenciées en fonction de leur nature et de leur exposition.

Nous proposons finalement d'évaluer les sources de rayonnement par leur *température radiante*, la température d'un corps noir qui émet un flux énergétique équivalent aux rayonnements de courtes et GLO émis par la source. Elle dépend des capacités d'absorption des matériaux et varie donc en fonction de la nature de la surface étudiée. La température radiante d'une source de rayonnement permet d'évaluer son impact sur le rafraîchissement des surfaces extérieures et du corps humain ; elle permet ainsi au MOE-U d'identifier les directions à privilégier pour favoriser le confort thermique des espaces extérieures, le rafraîchissement et le réchauffement des surfaces extérieures.

Cette thèse propose finalement (1) une méthodologie permettant d'atteindre dès les premières étapes de la conception un LoD important pour les bâtiments d'un projet d'aménagement urbain ; (2) une série d'indicateurs pour la caractérisation des sources lumineuses extérieures et l'évaluation de leur impact sur l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments ; (3) un modèle pour l'estimation la distribution de l'énergie GLO sur la voûte céleste ; (4) un indicateur pour la caractérisation des sources de rayonnement extérieures et l'évaluation de leur impact sur le rafraîchissement des surfaces et le confort thermique extérieur.

#### **MOTS-CLES**

Physique urbaine, Confort thermique extérieur, Température radiante, Rayonnement atmosphérique, Eclairage naturel, Autonomie en éclairage naturel, Modélisation numérique, Radiosité, Projet urbain, Aménagement urbain, Urbanisme.

#### ABSTRACT

The main objective of this work is to make possible the assessment of the *bioclimatism* of an urban project at its early stages: its capacity to harness daylight, the energy efficiency of the projected building and the thermal comfort of the outdoor environment.

A first proposal for the exterior geometry is made in the mass plan. At this stage, buildings are commonly represented as mass blocks. Architectural details, such as window shapes, interior coatings or wall compositions are not defined, and daylighting inside the buildings or thermal behavior of their envelope are impossible to model. Nevertheless, interviews of professionals of the building sector revealed that it is possible to estimate the opening index and the wall composition for a given localization based on a limited number of parameters.

We show that it is possible to evaluate, on the basis of those parameters, the impact of exterior light sources on daylighting inside the buildings as soon as in the mass plan. The indicators of *sufficient and useful luminances* are introduced; they traduce the percentage of the year in which an outside luminous source induces a convenient illuminance inside the buildings. Besides, the impact of the local climate on their distribution on the sky vault, and therefore on the direction to favor to harness daylight, is illustrated.

By a similar reasoning, we show that it is possible to evaluate the impact of an outside radiative source on the heating and cooling of the urban surfaces and on the outdoor thermal comfort as soon as in the mass plan. To this end, the indicator of *radiant temperature*, defined as the temperature at the radiative equilibrium of a surface exposed to a hemisphere with the same radiance as the radiative source, is introduced.

The atmospheric radiation, the longwave energetic flux from the sky, is commonly considered isotropic: its intensity is supposed the same in every directions. Observations showed that it varies from the zenith to the horizon, following a gradient which depends on the cloud cover. We propose a model which takes into account this phenomenon and show that it leads, when the whole sky vault is visible, to differences of up to five degrees on the mean radiant temperature, a key indicator of the outdoor thermal comfort. Its impact is lower in an urban context, where the longwave radiative flux from the outside surfaces is preponderant. This last observation leads us to a reflection on the consideration of the geometry in thermal modelling at the urban scale, especially on the maximal size of the meshes appropriate to estimate the radiant temperature of the exterior surfaces and its impact on the outdoor thermal comfort.

In the end, this thesis proposes a range of indicators for the evaluation of the impact of the outside radiative sources, with a focus on the sky vault, on the bioclimatism of an urban project at its early stages. It provides the basis of a modelling software designed for the mass plan, and likely to lead the urban planners in their search of bioclimatic urban forms: ensuring daylight access inside the buildings, energy efficiency and outdoor thermal comfort.

#### **Keywords**

Urban Physics, Outdoor thermal comfort, Radiant Temperature, Atmospheric radiation, Daylighting, *Daylight Autonomy, Useful Daylight Indicator*, Numerical modelling, Radiosity, Urban project, Urban planning, Urbanism.

## TABLE DES MATIERES

1	Intro	oduction Générale	3
	1.1	Notion de bioclimatisme	3
	1.2	Tendances d'urbanisation14	4
	1.3	Contexte réglementaire 14	4
	1.3.	.1 A l'échelle du bâtiment14	1
	1.3.	2 A l'échelle urbaine16	5
	1.4	Problématique18	3
2 d	Une a la co	e base de données pour la description des bâtiments dans les premières étapes	S
u.	21	Notion de projet urbain	, ,
	2.2	Identification des principaux acteurs de la conception	Ċ
	2.3 aspec	Niveaux de définition d'un projet d'aménagement et prise en compte des cts bioclimatiques	s 1
	2.4 aspec	Conception d'un outil à destination du MOE-U pour la prise en compte des cts bioclimatiques dans le plan masse	s 4
	- 2.4.	.1 Conception orientée objet d'outils de modélisation – Le langage UML.24	1
	2.4.	.2 Fonctionnalité principale de l'outil	7
	2.4.	.3 Définition de la géométrie extérieure28	3
	2.4. bas	.4 Définition des attributs sémantiques des bâtiments ; construction d'une se de données adaptée au plan masse	Ş
	2.5	Conclusion	3
3	Car	ractérisation des conditions d'éclairage naturel à l'étape du plan masse 39	7
	3.1	Introduction	7
	3.2	Modélisation de l'éclairage naturel : Etat de l'art	)
	3.2.	.1 Discrétisation de la voute céleste40	)
	3.2.	2 Calcul de la position du soleil	1
	3.2.	.3 Calcul de la luminance des tuiles de ciel42	2
	3.2.	.4 Modèle d'efficacité lumineuse46	5
	3.2.	.5 Maillage de la géométrie47	7
	3.2.	.6 Calcul des illuminances	)
	3.3	Modélisation de l'éclairage naturel à l'échelle urbaine	3
	3.3. bât	.1 Modélisation de l'éclairage naturel à l'intérieur et à l'extérieur des timents	s 3
	3.3.	2 Dimension des mailles et nombre de points de Gauss54	1
	3.3.	.3 Seuils de perception et caractérisation de l'éblouissement	7
	3.3.	.4 Estimation de l'illuminance intérieure à partir des luminances extérieures 58	S
	3.4	Evolution de l' <i>OVF</i> à l'intérieur d'un bureau type	?

	Identification des luminances utiles extérieures 61
3.5.	.1 Distribution de la lumière sur la voûte céleste61
3.5.	.2 Validation en milieu dégagé65
3.5.	.3 Prise en compte de l'environnement urbain
3.5.	.4 Validation dans un contexte urbain69
3.6	Analyse de l'impact des réflexions intérieures71
3.7 I'imp	Discussion sur la caractérisation du risque d'éblouissement et analyse de act des protections solaires
3.8 du m	Comparaison de la luminance utile de la voûte céleste dans différentes villes onde
3.9	Limites de l'étude
3.10	Conclusions
4 Ca des esp	ractérisation de l'efficacité énergétique des bâtiments et du confort thermique baces extérieurs à l'étape du plan masse
4.1	Introduction
4.2	Etat de l'art
4.2.	.1 Caractérisation du confort thermique extérieur80
4.2	.2 Modélisation du rayonnement atmosphérique82
4.2.	.3 Modélisation du flux GLO du sol et des parois extérieures
4.2.	.4 Simulation Thermique Dynamique (STD)89
4.3 aniso	Définition d'un modèle pour le calcul du rayonnement atmosphérique trope
4.3.	.1 Estimation de l'émissivité totale de la voûte céleste96
4.3.	.2 Estimation de l'émissivité directionnelle de la voûte céleste
4.4	Analyse de l'impact du couvert nuageux sur la distribution de l'émissivité su
la vo	
la vo 4.5 sous	Comparaison de la distribution de la température de ciel sur la voûte céleste différents climats
la vo 4.5 sous 4.6 bilan	Comparaison de la distribution de la température de ciel sur la voûte céleste différents climats
la vo 4.5 sous 4.6 bilan 4.7 confo	Comparaison de la distribution de la température de ciel sur la voûte céleste différents climats Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le thermique de l'enveloppe des bâtiments Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le ort thermique extérieur
la vo 4.5 sous 4 4.6 bilan 4.7 confo 4.8	Comparaison de la distribution de la température de ciel sur la voûte céleste différents climats
la vo 4.5 sous 4 4.6 bilan 4.7 confo 4.8	Comparaison de la distribution de la température de ciel sur la voûte céleste différents climats
la vo 4.5 sous 4.6 bilan 4.7 confc 4.8 4.9	Comparaison de la distribution de la température de ciel sur la voûte céleste   différents climats 102   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Vers une meilleure prise en compte des échanges GLO à l'échelle urbaine 108   Vers une meilleure prise en compte des échanges GLO à l'échelle urbaine 112   .1 Distribution de l'environnement radiatif extérieur 112
la vo 4.5 sous 4 4.6 bilan 4.7 confo 4.8 4.9 4.9	Comparaison de la distribution de la température de ciel sur la voûte céleste   différents climats 102   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le   thermique de l'enveloppe des bâtiments 104   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le   thermique de l'enveloppe des bâtiments 104   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Vers une meilleure prise en compte des échanges GLO à l'échelle urbaine 108   Vers une meilleure prise en compte des échanges GLO à l'échelle urbaine 112   10 Caractérisation de l'environnement radiatif extérieur 112   .1 Distribution de l'énergie sur la voûte céleste 112   .2 Identification des directions à privilégier pour capter le rayonnement CLC 114
la vo 4.5 sous d 4.6 bilan 4.7 confc 4.8 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 4.9 20	Comparaison de la distribution de la température de ciel sur la voûte céleste   différents climats 102   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 102   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le 104   Vers une meilleure prise en compte des échanges GLO à l'échelle urbaine 108   Caractérisation de l'environnement radiatif extérieur 112   1 Distribution de l'énergie sur la voûte céleste 112   2 Identification des directions à privilégier pour capter le rayonnement CLC 114   3 Identification des directions les plus favorables au confort thermique et rafraîchissement des surfaces extérieures 115

5	Conclusions générales	120
6	Perspectives	121
7	Références	123

#### GLOSSAIRE

Angle solide, le rapport entre la surface de la projection d'un objet sur une sphère et le carré du rayon de celle-ci

Angle zénithal  $\theta_{z}$  [°], angle entre le rayon du Soleil et l'axe de rotation de la Terre.

Azimut  $\gamma_z$  [°], angle dans le plan horizontal entre une direction donnée et la direction sud, compté positivement dans le sens horaire.

*Corps noir*, objet idéal absorbant l'intégralité de l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, caractérisé par une émissivité  $\varepsilon$  de 1. La neige, l'eau, la végétation ou la roche ont un comportement proche de celui d'un corps noir dans l'infrarouge lointain ( $\varepsilon > 0.95$ ).

*Corps gris,* corps noir qui réfléchit une fraction  $\rho = 1 - \varepsilon$  de l'énergie radiative qu'il reçoit.

*Emissivité*  $\varepsilon$ , capacité à absorber et restituer l'énergie radiative.

*Facteur de vue,* facteur purement géométrique traduisant la fraction de l'énergie émise par une surface reçue par une autre.

Facteur de vue différentiel, ou Facteur de vue de point à surface  $F_{dS-j}$ , fraction de la surface j visible depuis l'élément différentiel dS, pondérée par le cosinus de l'angle entre la normale à dS et la direction considérée. Il traduit la fraction de l'énergie émise par une surface j reçue en un point.

*Facteur de vue du ciel SVF*, fraction de la voûte céleste visible depuis une surface, pondérée par le cosinus de l'angle entre la normale à la surface et la direction considérée.

*Indice d'ouverture,* rapport de la surface vitrée totale du bâtiment et de sa surface plancher.

*Indice de cloisonnement,* rapport de la surface de cloisons intérieures et de la surface plancher.

*Irradiance* [W.m<sup>-2</sup>], puissance du rayonnement reçu par unité de surface.

Illuminance ou Eclairement [lux], flux lumineux reçu par unité de surface.

*Luminance* [lux.sr<sup>-</sup>], rapport de l'intensité lumineuse d'une source dans une direction donnée [cd] et de sa surface.

Maître d'Œuvre, équipe en charge de la conception architecturale des bâtiments d'un projet d'aménagement, généralement composée d'architectes, de bureaux d'études techniques.

Maître d'Œuvre Urbain, équipe en charge de la conception urbaine d'un projet d'aménagement, généralement composée d'architectes-urbanistes et de paysagistes, éventuellement accompagnés de bureaux d'études techniques.

*Radiance* [W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>], rapport de l'intensité énergétique d'une source [W.sr<sup>-1</sup>], la puissance du rayonnement dans une direction donnée, et de sa surface.

*Température radiante moyenne* [°C], la température uniforme d'une enceinte fictive dont les échanges radiatifs avec le corps humain sont égaux aux échanges radiatifs entre le corps humain et son environnement véritable.

#### **ABREVIATIONS**

ASE	" <i>Annual Sun Exposure</i> " : le pourcentage de la surface plancher recevant plus de 1000 lux durant au moins 250 heures au cours de l'année.
BRS	"Building Research Station".
CGI	"CIE Glare Index".
CLO	caractérise le rayonnement <i>de Courtes Longueurs d'Ondes</i> (<4 μm).
DA <sub>300</sub>	" <i>Daylight Autononomy</i> " : <i>Autonomie en éclairage naturel</i> ; l'indice rappelle le seuil de perception de 300 lux retenu.
EL	"Excessive Luminance" : Luminance excessive pour un OVF donné.
GLO	caractérise le rayonnement <i>de Grandes Longueurs d'Ondes</i> (>4 μm)
MOE	Maître d'Œuvre.
MOE-U	Maître d'Œuvre Urbain.
OVF	" <i>Outside View Factor</i> " : <i>Facteur de vue du ciel et des surfaces extérieures</i> depuis l'intérieur d'un bâtiment.
SVF	"Sky View Factor" : Facteur de vue du ciel.
SL	"Sufficient Luminance" : Luminance suffisante pour un OVF donné.
<i>UDI</i> <sub>300</sub>	" <i>Useful Daylight Indicator</i> " : <i>Indicateur d'éclairage naturel utile</i> ; l'indice rappelle le seuil de perception de 300 lux retenus.
UL	"Useful Luminance" : Luminance utile pour un OVF donné.

## 1 Introduction Générale

## 1.1 Notion de bioclimatisme

Le terme '*bioclimatisme*' est introduit par (Olgyay, 1962). Il suggère que le potentiel physique et psychique de l'être humain dépend directement de son environnement et le place au cœur de la mesure de la qualité de l'architecture (cf. Figure 1.1).



Figure 1.1. L'homme au cœur de la mesure en architecture (Olgyay, 1962, fig.34 p. 14)

La conception bioclimatique vise à optimiser les conditions de confort, notamment thermique et lumineux, à l'intérieur des bâtiments pour un climat donné (cf. Figure 1.2).



Figure 1.2. Imbrication des différents champs du bilan climatique (Olgyay, 1962, fig.31 p.12)

(Olgyay, 1962) se base notamment sur le constat fait par (Dollfus, 1954) de similitudes dans l'architecture vernaculaire à différents points du globe sous des climats similaires. Il tente ainsi d'identifier les caractéristiques architecturales les plus favorables à un climat donné et pose les bases de l'architecture bioclimatique.

## **1.2 Tendances d'urbanisation**

(Dollfus, 1954) étudie les formes architecturales caractéristiques des différentes régions du monde. Il montre que, jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les typologies constructives sont guidées par le climat local plus que par des spécificités culturelles. Il identifie quatre zones climatiques (chaude et humide / chaude et sèche / tempérée / froide) et pointe les ressemblances de l'habitat autochtone pour chacune d'elles en différents points du globe.

A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, l'arrivée de nouveaux procédés constructifs, tels que le béton armé, la climatisation ou les ascenseurs, conjuguée à l'essor de l'automobile et au faible coût de l'énergie ont radicalement modifié la conception de l'urbain. On assiste à une *globalisation de l'architecture* ; les mêmes pratiques sont employées pour des climats différents. On note la création de pôles commerciaux composés de gratte-ciels parfois entièrement vitrés (Manhattan à New York, La Défense à Paris, Moskva-City à Moscou, Lujiazui à Shangaï, Taipei à Taïwan, Central Business District de Sydney, ...), la densification des zones attenantes aux centres historiques des villes et une explosion de l'étalement urbain.

Les crises énergétiques et économiques qui ont suivi les chocs pétroliers de 1971 et 1978 ont entrainé une première mise en cause de ce modèle ; la communauté internationale prend conscience des enjeux environnementaux et les différents états s'équipent d'outils réglementaires visant à garantir la sobriété énergétique des bâtiments et le confort de leurs occupants.

## 1.3 Contexte réglementaire

## 1.3.1 A l'échelle du bâtiment

En France, une première *Réglementation Thermique* (RT) est adoptée suite au premier choc pétrolier en 1974. Elle s'applique aux bâtiments résidentiels et impose une isolation minimale, avec pour objectif une réduction de 25% des consommations énergétiques par rapport aux niveaux de consommations de 1950. Une nouvelle RT est adoptée en 1982 en réponse au second choc pétrolier, puis étendue aux bâtiments tertiaires en 1988. La RT2000 introduit une première exigence sur le confort d'été via la *Température Intérieure Conventionnelle* (TIC) : la température maximale atteinte durant 5 jours en été doit être inférieure à une température intérieure conventionnelle de référence fonction de la situation géographique du projet et de sa nature. La RT2005 implique un minimum de conception bioclimatique par la limite des consommations spécifiques des postes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage. La RT2012 constitue un véritable saut en avant et introduit notamment une limite des besoins en chauffage, en rafraîchissement et en éclairage via l'indicateur de *Besoin Bioclimatique* (Bbio). Globalement, les seuils de consommations réglementaires ont été divisés par un facteur trois entre 1974 et 2012.

Parallèlement à l'avènement de ces outils réglementaires, on assiste à la création de différents labels, notamment HQE et effinergie sur le territoire français, LEED et BREEAM à l'international (cf. Figure 1.3).



Figure 1.3. Evolution du cadre réglementaire à l'échelle du bâtiment – le contexte français

Le territoire métropolitain est divisé en *zones climatiques* (cf. Figure 1.4). Les exigences des différentes RT sont modulées pour chacune de ces zones, et induisent le recours à des procédés constructifs similaires ; il est donc possible d'identifier pour chacune de ces zones des typologies constructives propres à la période d'application des RT successives (avant 1949, 1949 à 1974, 1975 à 1981, 1982 à 1998, 1999 à 2006 et 2006 à 2012).



Figure 1.4. Zones climatiques (source : RT2012-Méthode de calcul Th-BCE)

On note l'apparition de textes analogues dans la plupart des pays du monde à des périodes différentes et cette méthode peut donc être appliquée au niveau mondial. A titre d'exemple, au Royaume-Uni, une première réglementation est adoptée suite au grand incendie de Londres en 1666 ; la loi *Building Act* est votée en 1984 et fixe les orientations à prendre pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Le standard allemand *EnEv* sur les économies d'énergie est adopté en 1976 et permet au gouvernement de fixer les exigences relatives à la thermique des bâtiments. Le *National Building Code of India* est créé en 1970 puis revu en 1983, 1987, 1997 et en 2005. En Chine, une première réglementation est adoptée en 1986 et vise à réduire de 30% la consommation énergétique des nouvelles constructions par rapport à 1980, cet objectif est notamment revu en 2007 avec l'obligation de réduction des consommations de 30 à 65% en fonction de la localité par apport au niveau de 1980.

L'ensemble de ces outils traduit la recherche de sobriété énergétique et du confort des occupants à l'échelle du bâtiment. A l'échelle de la ville ou du quartier, ces aspects sont généralement pris en compte de façon plus sommaire.

#### 1.3.2 A l'échelle urbaine

(Butti, 1980) rappellent que La notion de droit à la chaleur et à la lumière du soleil apparaît dès le cinquième siècle avant J.C. ; les grecs anciens, après avoir épuisé par la déforestation leurs réserves en bois, se tournent vers le soleil pour le chauffage des bâtiments. On retrouve ainsi des maisons individuelles orientées Nord-Sud, dotées de galeries extérieures sur la façade Sud laissant pénétrer le soleil à l'intérieur en hiver et entièrement closes sur la façade Nord ; des villes, notamment Prienne et le quartier North Hill d'Olynthe, dont la configuration géométrique assure une répartition équitable de l'énergie solaire en hiver (cf. Figure 1.5). Les auteurs rappellent les propos de Socrate, tels que rapportés par Xénophon (*Les Mémorables,* vers 370 avant J.C.) : « *Quand les maisons regardent le midi, le soleil ne pénètre-t-il pas, en hiver, sous les galeries extérieures, et, en été, passant au-dessus de nos têtes et par-dessus les toits, ne nous procure-t-il pas de l'ombre ?* ».



Figure 1.5. (gauche) Reconstruction d'une maison grecque classique, à partir des fouilles de la ville de Prienne par Theodor Wiegand ; (droite) Plan typique du quartier de North Hill de la ville d'Olynthe (Butti, 1980, p. 5 & 6);

(Butti, 1980) notent également la considération de l'accès au soleil et une première recommandation pour la prise en compte du climat local dans le projet d'architecture chez les romains, dont l'empire s'étendait des côtes sud de la Méditerranée au Nord de l'Allemagne. Ainsi, l'architecte Vitruve, qui inspira par ailleurs Leonard de Vinci, recommande dans son traité (*De architectura*, vers 15 avant J.C.) : « La disposition d'une maison aura été avantageusement choisie, si, pour la bâtir, on a eu égard au pays et au climat. Une typologie de maison est adaptée à l'Egypte, une autre à l'Espagne... toutes deux différentes de celle adaptée à Rome. »

(Capeluto, 2012) indique que l'on retrouve également la notion de droit au soleil dans les *Lois des Indes*, promulguées par les monarques espagnols pour réguler la vie sociale et économique dans leurs colonies en Amérique, ou encore dans la doctrine anglaise « Ancient lights » (1663), qui garantissait aux propriétaires dont une fenêtre a été exposée à la lumière et au vent pendant plus de vingt ans le droit d'empêcher toute construction qui viendrait l'en priver.

Le label LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), créé par le US Green Building Council en 1999, est étendu à l'échelle urbaine en 2007 avec l'avènement de la certification *LEED for Neighbourhood Development* (LEED ND). De même, les labels britannique BREEAM (*BRE Environmental Assessment Method*), développé en 1990 par le BRE (*Building Research Establishment*), et français HQE (Haute Qualité Environnementale), sont étendus aux opérations d'aménagement urbain respectivement en 2009 et en 2010 (cf. Figure 1.6).



Figure 1.6. Evolution des standards de performances à l'échelle urbaine

Les crédits attribués aux opérations d'aménagements pour ces trois labels sont divisés en différentes "familles", intégrant des aspects économiques et sociaux, les infrastructures de transport ou encore la préservation de l'écosystème et de la biodiversité. La caractérisation du bioclimatisme du projet ne repose sur aucun indicateur prédéfini. Le label HQE Aménagement propose par exemple une série d'indicateurs tels que le nombre d'heures d'ensoleillement des façades ou le nombre de bâtiments équipés de système de production d'énergies renouvelables, mais aucun n'est imposé. Le label BREEAM Communities attribue des crédits pour une simulation ou une étude portant sur le confort thermique extérieur ou l'accès au soleil sans en définir le cadre. Les indicateurs ayant trait à l'efficacité énergétique du projet sont ramenés pour ces trois labels à l'échelle du bâtiment, les crédits correspondant étant attribués en fonction du nombre de bâtiments du projet labellisés.

(Ng, 2012) pointe l'incapacité de ces outils réglementaires et méthodologiques à garantir l'accès au soleil et à la lumière naturelle dans des mégalopoles dont la densité peut atteindre 100 000 habitants par km<sup>2</sup>. Il souligne notamment la nécessité de mieux comprendre les différents types de ciel, et l'inadéquation de modèles développés dans des régions tempérées sous différents climats.

## 1.4 Problématique

Selon les Nations-Unies, la transition démographique s'est amorcée au 18<sup>ème</sup> siècle et arrivera à son terme en 2050 dans tous les pays du monde. La Terre compterait alors 9.5 milliards d'habitants. La croissance démographique se conjugue à une forte urbanisation et l'équivalent en surface cultivable de l'Italie est grignoté chaque année par les villes (Beckers, 2012). La Figure 1.7 illustre l'évolution de la population mondiale urbaine et rurale d'après les projections des Nations-Unies (U.N., 2014).



Figure 1.7. Evolution de la population mondiale (source des données : (U.N., 2014))

Les deux tiers de la population mondiale serait en 2050 concentrée dans des villes, dont un cinquième dans des mégalopoles de plus de 4 millions d'habitants. Pudong, à Shanghai, née de rien en 1993, est devenue l'un des plus gros centres financiers mondiaux et s'étend sur 1 210 km<sup>2</sup> pour environ 5 millions d'habitants. L'Inde veut construire ou réaménager 109 « villes intelligentes » et l'on estime à plus de 500 millions l'augmentation du nombre de citadins d'ici à 2050, soit l'équivalent de deux Singapour chaque année (Le Monde, 2017)... Dans ce contexte, il est aujourd'hui nécessaire de bâtir des villes de forte densité assurant le confort de leurs occupants.

Comment garantir, pour un climat donné, une exposition à la voûte céleste permettant l'éclairage naturel, la limite des besoins en chauffage et en rafraîchissement, le confort thermique des espaces extérieurs ?

Dans un contexte urbain, le ciel n'est que partiellement visible et les différentes surfaces de l'environnement se comportent comme autant de sources de rayonnement. Quels sont leurs impacts sur l'accès à la lumière naturelle, l'efficacité énergétique des bâtiments et le confort thermique des espaces extérieurs ?

A l'échelle du bâtiment, les équipes de maîtrise d'œuvre s'appuient dans leur recherche de formes bioclimatiques sur des indicateurs quantitatifs, obtenus par des modélisations impliquant une description fine des différentes composantes du projet. Quels liens existent-ils entre ces indicateurs et l'environnement radiatif extérieur ?

Cette thèse propose des éléments des éléments de réponse à ces problématiques par une analyse de la répartition de la lumière et de l'énergie sur la voûte céleste et sur les surfaces extérieures d'un environnement urbain, et de leurs liens avec les indicateurs couramment utilisés dans les projets d'architecture.

## 2 Une base de données pour la description des bâtiments dans les premières étapes de la conception

## 2.1 Introduction

Le projet urbain s'est substitué en France à l'urbanisme de plan dans le début des années 70. Ce mode de production de la ville apporte plus de souplesse aux aménageurs ; le *Maître d'œuvre Urbain* (MOE-U), à l'origine et garant de la cohérence globale du projet, propose un premier *plan masse* qui est ensuite affiné par le *Maître d'œuvre Bâtiment* (MOE), responsable de la construction des différents bâtiments du projet.

Les volumes englobants des différents bâtiments du projet sont définis par le MOE-U dans le *plan masse*. A cette étape, le manque de données descriptives des différents objets du projet ne permet ni la quantification de ses besoins énergétiques ni la caractérisation du confort thermique et lumineux, réalisées dans le *plan d'îlots* par le MOE. Un certain nombre de variables de conception sont cependant conditionnées par les orientations fixées par le MOE-U dès le plan masse et il est donc possible d'atteindre un niveau de détail permettant leur réalisation dès cette étape. Nous proposons de recourir à une base de données (BDD) de référence s'appuyant sur un nombre de paramètres limité afin de permettre la quantification des besoins énergétiques et la caractérisation du confort thermique et lumineux par le MOE-U dans le plan masse. (Nouvel, 2015) proposent un modèle de données pour la description des ensembles urbains, afin notamment de permettre l'interopérabilité entre différents outils de modélisation des consommations énergétiques à l'échelle urbaine. La BDD proposée qui se veut compatible avec ce nouveau modèle de données et les paramètres retenus pour la description des bâtiments du projet correspondent à ceux retenus dans ce-dernier.

Après un rappel de la notion de projet urbain nous présentons dans ce chapitre les principaux acteurs de l'aménagement et précisons leur rôle dans la prise en compte des aspects bioclimatiques à chaque étape de la conception. Nous identifions trois grands niveaux de définitions du projet d'aménagement : le *plan guide*, le *plan masse* et le *plan d'îlots*. Nous présentons enfin l'architecture de la BDD réalisée et détaillons pour chacun des objets retenus les attributs qui les caractérisent.

## 2.2 Notion de projet urbain

Suite à la Seconde Guerre Mondiale, l'Etat français crée en 1946 le *Commissariat Général au Plan* qui a pour mission la mise en œuvre d'une politique d'aménagement à l'échelle du territoire pour la reconstruction de la France. On entre dans la période des *trente glorieuses* ; les fortes croissances économique et démographique favorisent une urbanisation rapide et la modernisation des infrastructures. L'Etat mène une politique d'aménagement standardisée, caractérisée par le zonage de l'espace et la séparation des différentes fonctions de la ville (Tardieu, 2015).

L'urbanisme de plan est fortement remis en cause suite au choc pétrolier de 1971 et l'apparition des premiers signes de malaise social, notamment dans les Zones à Urbaniser en Priorité (ZUP). Les enjeux de la politique urbaine évoluent et la collectivité territoriale locale devient un acteur central de la politique d'aménagement ; le projet urbain se substitue à l'urbanisme de plan (Tardieu, 2015).

La logique de projet marque le passage d'un mode de *production* de la ville centralisée par l'Etat à un mode de *coproduction* basé sur la coopération de l'ensemble des acteurs concernés par la production, la gestion et l'usage de la ville (Arab, 2004). On passe d'une « planification centralisée et technocratique à une approche plus ouverte aux débats et aux négociations » (Ingallina, 2010). Cette approche est inspirée de l'exemple de la ville de Bologne, qui mena dans la fin des années 1960 une

démarche fondée sur la notion de *recupero* urbain dans laquelle le contexte existant et l'opinion des habitants sont placés au cœur du processus de planification (Ingallina, 2010).

(Devillers, 1994) propose l'une des premières définitions du projet urbain en France. Il le différencie notamment du projet architectural par sa continuité dans l'espace et dans le temps et son aspect pluridisciplinaire, le projet architectural étant fondé sur « l'unité de lieu, de temps et de concept ». (Ingallina, 2010) précise cette définition qu'elle axe autour de trois thèmes : l'introduction du temps, la multidisciplinarité et la participation. Elle propose trois niveaux de définition du projet urbain : *local, global* et *complexes* (cf. Figure 2.1). Le *projet urbain global* s'inscrit dans le processus de planification stratégique à l'échelle de l'agglomération et inspire les orientations du *Schéma de COhérence Territoriale* (SCOT). Le *projet urbain local* est la déclinaison des objectifs stratégiques à l'échelle de la ville, synthétisés dans le *Plan Local d'Urbanisme* (PLU) qui fixe les règles d'aménagement et d'utilisation des sols. Ces objectifs se traduisent par des *projets urbains complexes* à l'échelle opérationnelle, le plus souvent celle du quartier.

Le SCOT est établi par un syndicat intercommunal ou un *Etablissement Public de Coopération Intercommunal* (EPCI). Le PLU est établi par la commune. Ce dernier peut être intercommunal (PLUi) et dans ce cas son élaboration peut être confiée à un EPCI. Le PLU et le SCOT sont tenus de prendre en compte le *Projet d'Aménagement et de Développement durable* (PADD), établi sur bases d'un diagnostic et définissant les projets d'aménagement à réaliser sur les différentes communes du territoire. Le PADD se veut simple et concis et doit permettre un échange avec les citoyens et habitants sur le projet territorial. La loi impose notamment un débat sur le PADD au sein de l'organe délibérant de l'EPCI ou du conseil municipal dans un délai de deux mois avant l'examen du projet de PLU.



Figure 2.1. Projets urbains global, local et complexes (Ingallina, 2010, p.38)

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la planification opérationnelle et nous focaliserons donc sur les projets urbains complexes, à l'échelle du quartier ou du morceau de ville. Le terme projet urbain renvoie dans la suite de cette thèse à cette étape de la planification.

## 2.3 Identification des principaux acteurs de la conception

Une opération d'aménagement est financée par le *maître d'ouvrage* (MO), qui en élabore le *programme d'opération*; il fixe le calendrier, détermine la localisation et le périmètre du projet, établit la Superficie Hors Œuvre Nette (SHON) totale à bâtir et sa répartition en logements, commerces, bureaux ou équipements publics. Il est représenté par une personne physique (particulier) ou une organisation (promoteur immobilier, collectivité territoriale) et peut déléguer tout ou partie de ses tâches à un *assistant à la maîtrise d'ouvrage* (AMO). On distingue le MO, qui finance le projet, et ses utilisateurs, qui en auront l'usage ; les surcouts associés à la limite des besoins énergétiques ne sont donc pas directement compensés par les économies réalisées en phase d'exploitation.

Le MO découpe le projet en îlots, dont la conception est assurée par une ou plusieurs équipes de maîtrise d'œuvre, composées notamment d'urbanistes, de paysagistes, d'architectes et de bureaux

d'études techniques. (Tardieu, 2015) rappelle la distinction à opérer entre le *maître d'œuvre* (MOE), responsable de la conception d'une opération limitée à un bâtiment, et le *maître d'œuvre urbain* (MOE-U), responsable de la création d'un quartier ou d'une ville. Nous distinguerons dans la suite de cette thèse le MOE-U, qui veille à la mise en œuvre de la stratégie globale du projet dans les différents îlots, et le MOE, responsable de la conception des bâtiments dans chacun d'entre eux. Le MOE-U est l'architecte-urbaniste-coordinateur responsable de l'opération d'aménagement dans sa globalité, il n'est généralement pas directement impliqué dans la conception des différents îlots projet mais responsable pour chacun d'eux de l'élaboration du cahier des charges techniques et coordinateur des espaces publics. Le MOE est chargé par le MOE-U de la conception d'un ou plusieurs îlots du projet.

L'équipe de MOE-U regroupe généralement architectes, urbanistes et paysagistes et peut être associée à un bureau d'études techniques. L'équipe de MOE est généralement constituée d'architectes et de bureaux d'études techniques, qui peuvent disposer en interne de compétence en urbanisme et paysagisme. Une même équipe peut se voir confier la fonction de MOE-U sur une opération donnée et de MOE sur une autre ; la distinction entre ces deux acteurs est opérée suivant la mission qui leur est confiée sur un projet donné et non en fonction de leurs compétences respectives.

Le déroulement d'un projet d'aménagement n'est pas linéaire mais constitue un processus itératif ; les différents acteurs n'interviennent pas dans un ordre précis, leurs interventions se superposent et se succèdent (Tardieu, 2015). Le projet évolue donc avec le temps et sa version finale diffère bien souvent de celui soumis en phase de concours. Le MOE-U est confronté à deux problématiques :

- Evaluer le caractère bioclimatique du projet dans les premières étapes de la conception afin de mettre en avant cet aspect dès la phase de concours ;
- Evaluer l'impact des différents choix de conception réalisés à l'échelle d'un bâtiment sur l'ensemble du projet.

# 2.4 Niveaux de définition d'un projet d'aménagement et prise en compte des aspects bioclimatiques

Dans le cadre du projet *SERVEAU*, nous avons eu accès aux documents produits par les équipes d'AMO, de MOE-U et de MOE lors de différentes opérations d'aménagement, de la phase de concours à la réalisation concrète du projet. Si l'analyse de ces données révèle la disparité des modes de fonctionnement, il apparaît toutefois possible d'identifier trois grands niveaux de définition d'un projet urbain : le *plan guide*, le *plan masse* et le *plan d'îlot*.

Le MOE-U répartit les différents éléments du programme d'opération en deux dimensions sur le périmètre du projet dans le plan guide (cf. Figure 2.2), qui constitue une représentation graphique des principaux flux et du fonctionnement du futur quartier. Il découpe avec la MO le périmètre du projet en îlots et fixe les premières orientations en termes d'efficacité énergétique (label, RT) des différents bâtiments du projet. Les objectifs affichés sont déclaratifs et peuvent évoluer au cours du projet sous l'impulsion de la MO, du MOE-U et parfois de la MOE.

Le MOE-U propose dans le plan masse une première réflexion sur la géométrie extérieure du projet, sous la direction de la MO et en respectant les contraintes induites par le cadre bâti existant et le PLU. Les volumes sont introduits sous forme de prismes droits, avec le niveau de détail LOD1 (*Level Of Detail*) de la norme CityGML (OGC, 2012) (cf. Figure 2.3). Le manque de données ne permet pas à cette étape une analyse avancée des aspects bioclimatiques. L'accès à la lumière et au soleil notamment sont généralement caractérisés par l'étude du nombre d'heures d'ensoleillement sur les façades et/ou la projection des ombres portées des différents bâtiments du projet aux solstices et aux équinoxes. Le MOE-U ne dispose pas toujours en interne des compétences nécessaires à la réalisation de ces études et peut faire appel dès cette étape à un bureau d'études techniques.



Figure 2.2. Exemple de Plan guide, ZAC du Libéra, Colombelles, source : Michel Guerin, architecteurbaniste, 2006



Figure 2.3. Exemple de Plan Masse, ZAC Masséna-Bruneseau, Paris (source : Mairie de Paris, 2010)

La volumétrie définie dans le plan masse constitue la base de la réflexion du MOE pour la réalisation du plan d'îlot. Ce dernier marque la frontière entre l'échelle urbaine et celle du bâtiment. Les différents îlots du projet sont confiés à une ou plusieurs équipes de MOE qui définissent le projet architectural. Les bâtiments sont représentés avec le niveau de détail LOD4 (cf. Figure 2.4) ; l'inclinaison des toitures, la composition des parois ou la répartition et la forme des vitrages sont introduits. La réalisation d'études thermodynamiques complètes justifiant des performances énergétiques des différents bâtiments du projet est alors obligatoire pour l'obtention du permis de construire.



Figure 2.4. Exemple de plan d'îlot, Quartier du Mesnil, ZAC Brétigny-sur-Orge, Paris (<u>source</u>: Atelier Jam-Latitude Nord, Mission Morel Jeol)

La capacité d'action sur un projet diminue avec son avancement (cf. Figure 2.5). (Vermeulen, 2013) montrent notamment l'impact de variables de conception définies dans le plan d'îlots, telles que la conductivité thermique des parois ou leur taux de vitrages, sur la recherche d'une configuration géométrique de l'urbain optimale au regard des consommations énergétiques ; (Shi, 2011) montrent par ailleurs l'impact des coefficients de réflexion et de l'émissivité des surfaces extérieures, également définis au plan d'îlots, sur les besoins de chauffage et de rafraîchissement.



Figure 2.5. Convergence des projets, (source : (Midler, 1993, p.87)

Dans le plan masse, seuls sont connus la situation géographique du projet, le niveau de performance et l'usage des bâtiments qui le composent ; à cette étape, le manque de données sur le projet constitue

donc le principal frein à une meilleure prise en compte des aspects thermiques et lumineux. Nous avons dans le cadre du projet *SERVEAU* conduit des entretiens auprès d'équipes composées d'architectes et d'ingénieurs de bureaux d'études techniques afin d'établir les conditions d'une analyse plus fine de ces aspects dès cette étape. Il est rapidement apparu que certaines variables de conception sont conditionnées par le climat local, l'usage et le niveau de performance des bâtiments. Un bâtiment de bureau à Paris a par exemple un coefficient de conductivité thermique des parois de l'ordre de 0.25 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> pour niveau de performance RT 2012, de 0.20 pour un bâtiment labellisé *effinergie* +, de 0.15 pour un label *Bepos*. Il apparaît donc possible d'atteindre un niveau de détail plus fin des différents éléments du projet, et donc de réaliser les modélisations nécessaires à l'évaluation des aspects thermiques et lumineux dès cette étape.

## 2.5 Conception d'un outil à destination du MOE-U pour la prise en compte des aspects bioclimatiques dans le plan masse

Cette thèse a été réalisée au cœur d'une entreprise de développement informatique avec pour objectif final le développement d'un logiciel à destination des acteurs de l'aménagement. Il a donc été choisi de recourir au langage UML (*Unified Modified Language*), qui repose sur des diagrammes graphiques et facilite le dialogue entre l'équipe de développement et l'utilisateur final de l'outil ; ce langage permet de formaliser les fonctionnalités d'un outil de modélisation (diagramme des *cas d'utilisation*) et d'en structurer la base de données (diagramme de *classes*).

## 2.5.1 Conception orientée objet d'outils de modélisation – Le langage UML

Formalisé en 1997, le langage UML est le premier standard international en conception de système d'information ; c'est l'aboutissement de la conception *orientée objet* d'outils de modélisation. La programmation orientée objet consiste à se focaliser sur les composants du système. Le langage UML standardise les modèles et notations utilisés lors du développement ; c'est une notation utilisée pour décrire les différents objets du modèle et leurs relations.

Un *cas d'utilisation* correspond à une fonctionnalité de l'outil. Le diagramme des cas d'utilisation permet de les lister et de les hiérarchiser, suivant la symbologie présentée dans le Tableau 2.1.

Acteur	Acteur
"Fonctionnalité"	Cas d'utilisation
	Relation de généralisation
	Relation d'association
>	Relation d'association
< <include>&gt;</include>	Relation d'inclusion
< <extend>&gt;</extend>	Relation d'extension

Tableau 2.1. Symbologie des diagrammes de cas d'utilisation

La notion de *classe* est une notion abstraite : deux objets appartiennent à la même classe si et seulement si ils ont les mêmes attributs et le même comportement. Un objet est une *instance* de classe, il est caractérisé par son identité (= *libellé*) et un état (= *valeurs de ses attributs*). Dans l'exemple proposé Figure 2.6, le bâtiment A est une instance de la classe *bâtiment* ; comme tout bâtiment, il est caractérisé par une SHON, une hauteur et un niveau énergétique.



Figure 2.6. Exemples d'objet et de classe

La symbologie régissant les diagrammes de classes est présentée dans le Tableau 2.2.

- class +Attribut +Operation()	Classe						
	Relation de généralisation						
	Relation d'association						
>	Relation d'association directe						
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	Relation de dépendance						
→	Relation d'agrégation						
	Relation de composition						

Tableau 2.2. Symbologie des diagrammes de classes

Les relations de généralisation sont utilisées dans les diagrammes de classes et de cas d'utilisation. Elles traduisent, comme leur nom l'indique, la *généralisation* du *cas d'utilisation* ou de la *classe* à la base de la flèche. Dans l'exemple de la Figure 2.7, la fonctionnalité de création d'un bâtiment est une généralisation des fonctions de création de bâtiments existant ou du projet.



Figure 2.7. Exemple de relation de généralisation

Elles induisent une notion d'héritage simple : une classe **hérite des propriétés** d'une superclasse. Dans l'exemple de la Figure 2.8, les classes « Piste cyclable », « Cheminement piéton » et « Voie de desserte » héritent des propriétés de la superclasse voirie.



Figure 2.8. Exemple de relation de généralisation

Les relations d'inclusion et d'extension sont propres au diagramme de classes ; elles indiquent respectivement qu'un cas d'utilisation en implique ou peut en implique un autre. Dans l'exemple proposé Figure 2.9, la création d'un bâtiment de projet implique que l'utilisateur saisisse le contour délimitant son implantation, définisse son niveau énergétique (labels, RT, etc.), l'usage qui lui est associé et un nombre d'étages. Il a la possibilité de raccorder ou non le bâtiment à un réseau de chaleur.



Figure 2.9. Exemple de relations d'inclusion et d'exclusion

Les relations d'agrégation et de composition sont également réservées aux diagrammes de classes et traduisent une notion d'héritage multiple : une superclasse est, ou peut être, constituée de différentes classes. La relation de composition est une relation d'agrégation « *forte* » : une relation de composition indique qu'une superclasse <u>est</u> constituée de différentes classes, une relation d'agrégation indique qu'une superclasse <u>peut être</u> constituée de différentes classes. Dans l'exemple proposé Figure 2.10, le bâtiment est nécessairement composé d'une toiture, de façades et d'un plancher, l'utilisateur peut éventuellement lui associer des plaques solaires photovoltaïques.



Figure 2.10. Exemple de relations d'agrégation et de composition

## 2.5.2 Fonctionnalité principale de l'outil



Figure 2.11. Diagramme des cas d'utilisation général

L'outil doit permettre l'évaluation du bioclimatisme d'un projet dans le plan masse ; ce qui implique la saisie dès cette étape des différentes composantes du projet, notamment des bâtiments et de l'espace public (cf. Figure 2.11). Le MOE-U doit donc définir la géométrie extérieure des bâtiments du projet et définir leurs attributs *sémantiques*, tels que la composition des parois, le type de vitrage et de protection solaire, la typologie d'aménagement intérieur, etc... La durée impartie à la réalisation du plan masse ne permet pas au MOE-U de saisir ces données dans le détail et il est donc nécessaire de s'appuyer à cette étape sur un nombre de paramètre limité.

## 2.5.3 Définition de la géométrie extérieure

La représentation géométrique de l'urbain implique l'acquisition des données caractéristiques des différents objets qui le composent (bâtiments, voiries, espaces minéralisés, etc.). Plusieurs méthodes existent pour la génération de modèles géométriques urbains, (Aliaga, 2012) propose de les répartir en 3 groupes : *de reconstruction, interactives* et *procédurales*.

Les méthodes de reconstruction sont basées sur des algorithmes de reconstruction automatique de la ville à partir d'images satellites ou de scanners LIDAR et lasers. Les modèles ainsi générés ne sont cependant pas structurés (les différents triangles ne sont pas différenciés en fonction, par exemple, de leur appartenance à une paroi de bâtiment ou à un revêtement de voirie) et ils sont donc difficilement modifiables.

Les méthodes interactives reposent sur une intervention manuelle de l'utilisateur et le recours à des outils de *Conception Assistée par Ordinateur* (CAO). (Aliaga, 2012) associe également à cette famille les méthodes basées sur la photogrammétrie.

Les méthodes procédurales exploitent les ressemblances entre les différents objets urbains. On définit une procédure, les règles qui régissent la géométrie de ces objets, et on peut ainsi les générer à partir d'un nombre limité de paramètres. Ces méthodes permettent l'atteinte d'un niveau de détail important pour un faible investissement humain. Elles sont notamment utilisées par le logiciel CityEngine<sup>®</sup>.

Les méthodes évoquées ici dépassent le cadre de cette thèse et nous avons opté pour des modèles paramétriques simples. Nous nous intéressons à l'étape particulière du plan masse. Pour ce niveau de définition d'un projet urbain, nous avons vu précédemment que le modèle géométrique est associé au LOD1 : les bâtiments sont représentés par des prismes droits, définis par un contour délimitant leur implantation au sol et une hauteur. Le contour délimitant les différents étages d'un bâtiment n'est pas nécessairement le même, avec par exemple un rez-de-chaussée (RdC) à usage de commerce s'étendant sur une surface plus importante que les étages supérieurs, à usage de bureaux ou de logements.

(Nahon, 2013) analysent l'impact du niveau de détail de la maquette numérique et montrent l'importance de la prise en compte des toitures dans la caractérisation de l'accès à l'énergie solaire dans les bâtiments. Nous choisissons de considérer quatre typologies de toiture (cf. Figure 2.13) : plane pour une base quelconque et à un, deux et quatre pans inclinés pour une base rectangulaire. L'inclinaison des pans de toiture est définie par un angle *i* dans le cas d'une toiture à un ou deux pans, par deux angles  $i_1$  et  $i_2$  dans le cas d'une toiture à quatre pans inclinés. On peut à partir de ces typologies reconstituer rapidement un morceau de ville et représenter environ 80% des bâtiments existants. Pour une analyse plus complète il convient de compléter ces typologies notamment pour la prise en compte des bâtiments en « L » et en « T ».

La Figure 2.12 illustre les étapes nécessaires à la définition de la géométrie extérieure d'un bâtiment. Le MOE-U saisit le contour d'implantation du bâtiment, qu'il peut éventuellement modifier pour chacun de ses étages. Il définit le nombre d'étages du bâtiment, la hauteur sous plafond (HSP) est liée à l'usage du bâtiment, il peut toutefois la modifier pour chaque étage. La toiture est par défaut considérée plane, l'utilisateur peut cependant sélectionner pour les bâtiments de bases rectangulaires l'une des trois typologies de toiture proposées.



Figure 2.12. Saisie de la géométrie extérieure des bâtiments



2.5.4 Définition des attributs sémantiques des bâtiments ; construction d'une base de données adaptée au plan masse

## 2.5.4.1 Fonctionnement général

Les entretiens conduits auprès des partenaires du projet SERVEAU ont permis d'identifier un jeu de paramètres limité conditionnant les attributs sémantiques des bâtiments : la *zone climatique* du projet, l'*usage*, le *standard de performance* et une *typologie de structure*. Nous proposons donc de construire une base de données (BDD) permettant leur définition sur base de ces paramètres : pour une zone climatique donnée, le MOE-U sélectionne un usage, un standard de performance et une typologie de structure et définit ainsi l'ensemble des propriétés physiques des bâtiments du projet.

La Figure 2.14 illustre la définition des attributs sémantiques d'un bâtiment par le MOE-U dans le plan masse pour une zone climatique préalablement sélectionnée. Les cas d'utilisation représentés en *bleu* sont automatiquement effectués par lecture de la base de données.



Figure 2.14. Définition des attributs sémantiques

A chaque localisation géographique est associée une *zone climatique* qui conditionne notamment les performances thermiques de l'enveloppe. Nous retenons sur le territoire français les 3 zones climatiques *H1*, *H2* et *H3* définies dans la RT (cf. § 1.3.1).

Le *standard de performance* correspond au niveau d'exigence de la MO et du MOE-U en termes d'efficacité énergétique des bâtiments. Pour les bâtiments existants, nous proposons pour le territoire français six standards de performances fonction de la réglementation thermique en vigueur à la date de construction (cf. §1.3.1) : avant 1949, 1949 à 1974, 1975 à 1981, 1982 à 1998, 1999 à 2006 et 2006 à 2012. Pour le neuf nous proposons trois standards de performance couramment retenus sur le territoire métropolitain:

- standard, pour un niveau de performance réglementaire (RT2012) ;
- amélioré, pour un label Effinergie+ ;
- passif, pour un label BEPos.

L'*usage* correspond à la fonction du bâtiment. Nous retenons les plus couramment rencontrés dans un projet d'aménagement :

- Logement ;
- Bureau;
- Commerce ;
- Enseignement supérieur ;
- Enseignement primaire et secondaire ;
- Etablissements d'accueil de la petite enfance (EAPA) ;
- Etablissements d'hébergement pour personnes âgées dépendantes (EHPAD) ;
- Parkings;
- Gymnases et autres salles de sport.

Pour une zone climatique et un usage donnés, les performances thermiques des parois opaques et vitrées, notamment leur conductivité thermique U [W.m<sup>2</sup>.K<sup>-1</sup>], sont déterminées par le standard de performance. On note en effet des valeurs U minimales imposées ou recommandées dans les différents labels et réglementations. Pour un même niveau de performances thermiques, plusieurs solutions constructives sont possibles ; nous proposons donc de laisser le choix au MOE-U entre différentes *typologies de structure*, par exemple *béton*, *ossature bois* et *ossature métallique*.

Par défaut, la répartition des vitrages sur les différentes façades est telle que le taux de vitrage est constant sur chacune d'elles. Le MOE-U peut toutefois jouer sur ce paramètre et proposer par exemple une double orientation ou une répartition des vitrages *héliotrope*, tournée vers le Soleil, afin d'analyser son impact sur l'efficacité énergétique des bâtiments de son projet.

#### 2.5.4.2 Définition des usages

On associe à chaque couple usage (cf. Figure 2.15) :

- une hauteur sous plafond (HSP);
- un *indice d'ouverture*, rapport de la surface vitrée totale du bâtiment et de sa surface plancher ;
- une modèle d'aménagement intérieur ;
- un scénario annuel d'occupation ;
- un scénario annuel de modulation des équipements et de l'éclairage ;
- un scénario annuel de régulation pour le chauffage et la climatisation.

Pour un usage et une zone climatique donnés, on définit pour chaque couple standard de performance & typologie de structure un *modèle d'enveloppe*. Le taux de renouvellement d'air dépend uniquement de l'usage ; le type de système de ventilation et notamment l'éventuel rendement de récupération de chaleur sur l'air extrait dépend du standard de performance.



Figure 2.15. Définition des usages

L'*indice d'ouverture* dépend de paramètres historiques et culturels. En France, un impôt sur les portes et les fenêtres a par exemple été mis en place de 1798 à 1926, ce qui a eu pour incidence la limite des surfaces vitrées sur cette période. On trouve des exemples similaires notamment en Grande Bretagne en et en Espagne. Nous proposons toutefois de lier l'indice d'ouverture à l'usage des bâtiments.

## 2.5.4.3 Définition des répartitions de vitrages

Chaque étage est associé à un usage, lui-même caractérisé par un indice d'ouverture. La surface vitrée totale de chaque étage est calculée en fonction de sa surface plancher, elle est ensuite affectée à chacune de ses façades au prorata de sa surface, de façon à obtenir un taux de vitrage uniforme sur chacune d'elles.

La répartition des vitrages sur les différentes façades d'un bâtiment a un impact majeur sur ses besoins bioclimatiques ; il apparaît nécessaire de permettre au MOE-U d'analyser l'impact de ce paramètre sur l'efficacité énergétique de son projet. On définit à cette fin des *répartitions types des vitrages* : on attribue un coefficient de pondération à chacune des orientations cardinales Sud, Est, Nord et Ouest (cf. Figure 2.16). Pour une répartition uniforme, on applique un coefficient de 100% sur chacune des orientations. Si l'on souhaite par exemple un taux de vitrage deux fois supérieur au Sud, on applique un coefficient de pondération de 200% pour cette orientation et de 100% sur les autres.



Figure 2.16. Définition des répartitions types des vitrages

Le coefficient de pondération associé à une paroi donnée dépend de son orientation : on le calcule à partir des coefficients de pondération affectés aux orientations cardinales qui l'encadrent. On définit l'*azimut* d'une façade comme l'angle dans le plan horizontal de son orientation et de la direction sud, compté positivement dans le sens horaire. Pour une paroi d'azimut 45°, le coefficient de pondération est par exemple égal à la moyenne de ceux affectés aux orientations Sud et Ouest.

Dans le cas où la surface vitrée affectée à une paroi est supérieure à la surface totale de la paroi, le taux de vitrage est fixé à 100% et l'excédent est réparti sur les autres parois du bâtiment en fonction de leur coefficient de pondération.

On choisit d'appliquer par défaut une répartition uniforme pour l'ensemble des bâtiments du projet : on considère un taux de vitrage identique sur chacune des parois du bâtiment.

## 2.5.4.4 Définition des modèles d'enveloppe

On associe à chaque quatuor *zone climatique, usage, standard de performance* et *typologie de structure* un *modèle d'enveloppe*. Ce-dernier contient les données descriptives des parois opaques et vitrées d'un bâtiment.

On différencie les parois verticales, la toiture et le plancher. On définit pour chacun d'eux les caractéristiques thermiques de leurs couches constitutives et coefficient de réflexion extérieur. Les parois vitrées sont associées à un coefficient de conductivité thermique globale, un facteur solaire, traduisant la fraction de l'énergie incidente pénétrant à l'intérieur du local, et un facteur de transmission lumineuse, traduisant la fraction d'énergie lumineuse pénétrant à l'intérieur (cf. Figure 2.17).



Figure 2.17. Définition des modèles d'enveloppes

## 2.5.4.5 Définition des modèles d'aménagement intérieur

L'aménagement intérieur des différents bâtiments n'est pas défini dans le plan masse et il apparaît difficile d'émettre des hypothèses pour sa description à cette étape. Nous proposons toutefois d'associer à chaque usage un local-type attenant aux façades extérieures caractérisés par une profondeur et une largeur.

La masse des cloisons intérieures peut avoir une incidence forte sur les besoins en chauffage et en rafraîchissement. Il est possible de définir pour chaque usage une typologie de cloisonnement intérieur, caractérisée par un *indice de cloisonnement*, rapport de la surface de cloisons intérieures et de la surface plancher, et un modèle de cloisons intérieures (cf. Figure 2.18)



Figure 2.18. Définition des modèles d'aménagements intérieurs

## 2.5.4.6 Définition des scénarios annuels d'occupation

Les profils d'occupation des bâtiments sont directement conditionnés par leur usage. Ces derniers varient en fonction du jour de la semaine (e.g. : distinction entre les weekends et les jours ouvrés) et de la semaine de l'année (e.g. : périodes de vacances scolaires). On définit donc pour chaque usage un ratio d'occupation [pers/m<sup>2</sup>] et un profil annuel de modulation de l'occupation (cf. Figure 2.19) ; on définit pour chacune des 52 semaines de l'année un profil de modulation hebdomadaire (coefficients horaires de 0 à 1, e.g. Tableau 2.3).



Figure 2.19. Définition des scénarios annuels d'occupation

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lundi	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Mardi	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Mercredi	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Jeudi	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Vendredi	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Samedi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dimanche	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau 2.3. Profil de modulation hebdomadaire de l'occupation d'un bâtiment à usage de logement hors vacances scolaire

#### 2.5.4.7 Définition des scénarios de modulation

Pour un usage donné, nous estimons les puissances d'équipements et d'éclairage installées suivant un ratio surfacique. On définit pour chaque usage un scénario annuel pour la modulation des équipements et un autre pour la modulation de l'éclairage artificiel, de façon analogue à la modulation de l'occupation : on définit des profils hebdomadaires types que l'on applique sur chacune des 52 semaines de l'année (cf. Figure 2.20).



Figure 2.20. Définition des scénarios de modulation

## 2.5.4.8 Définition des scénarios de régulation

De même, les températures de consigne pour le chauffage et la climatisation sont fonction de l'activité et de la présence des occupants au sein du local et varient au cours d'une année. A titre d'exemple, on maintient une température plus élevée en période de chauffage dans un établissement d'hébergement pour personnes âgées que dans un logement classique ; le chauffage n'est pas assuré dans les établissements d'enseignement en période de vacances scolaires. On définit donc pour chaque usage un scénario annuel de régulation du chauffage et de la climatisation (cf. Figure 2.21) ; on définit des profils de régulation hebdomadaires de régulation, spécifiant les températures de consigne pour chaque heure de la journée (cf. Tableau 2.4), que l'on applique sur chacune des 52 semaines de l'année.



Figure 2.21. Définition des scénarios de chauffage et de rafraîchissement.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lundi	7	7	7	7	7	7	7	7	19	19	19	19	19	19	19	19	19	16	16	16	16	16	16	16
Mardi	16	16	16	16	16	16	16	16	19	19	19	19	19	19	19	19	19	16	16	16	16	16	16	16
Mercredi	16	16	16	16	16	16	16	16	19	19	19	19	19	19	19	19	19	16	16	16	16	16	16	16
Jeudi	16	16	16	16	16	16	16	16	19	19	19	19	19	19	19	19	19	16	16	16	16	16	16	16
Vendredi	16	16	16	16	16	16	16	16	19	19	19	19	19	19	19	19	19	7	7	7	7	7	7	7
Samedi	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Dimanche	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Tableau 2.4. Profil de régulation hebdomadaire pour le chauffage d'un bâtiment à usage de bureau

## 2.5.4.9 Définition des scénarios de ventilation

Le système de ventilation doit assurer la qualité de l'air au sein du local ; un taux de renouvellement d'air est défini pour chaque *usage* en fonction du nombre d'occupants et donc du scénario d'occupation du local. Pour un usage donné, le type de système de ventilation, et notamment l'éventuel rendement de récupération de chaleur sur l'air extrait, dépend du standard de performance ; pour un usage donné, on définit pour chaque couple *zone climatique & standard de performance* le rendement de récupération de chaleur du système de ventilation (cf. Figure 2.22).



Figure 2.22. Définition des scénarios annuels de ventilation

## 2.5.4.10 Diagramme de classe

Les différents objets ainsi constitués et les attributs qui les caractérisent sont représentés dans la Figure 2.23 sous forme de diagramme de classes. Les classes représentées en *jaune* correspondent aux paramètres sélectionnés par le MOE-U au moment de la création d'un bâtiment dans le plan masse ; en *bleu ciel* les paramètres sur lesquels il peut éventuellement jouer à cette étape ; en *bleu marine* les paramètres généralement définis à l'étape du plan d'îlots par le MOE et relevant de sa compétence en ingénierie du bâtiment.

L'objet *Bâtiment*, est composé par une succession d'étages. Chacun d'entre eux est associé à un usage, un standard de performance et une typologie de structure. Lui sont associés sur bases de ces trois paramètres : (1) un modèle d'aménagement intérieur ; (2) un modèle d'enveloppe extérieure ; (3) un scénario annuel d'occupation ; (4) des scénarios annuels de modulation des équipements et de l'éclairage artificiel; (5) un scénario annuel de régulation des équipements de chauffage et de climatisation ; (6) un scénario annuel de ventilation.

Le modèle d'aménagement intérieur définit un indice de cloisonnement, rapport des surfaces de cloisons verticales sur la surface plancher, et est associé à une cloison intérieure type ; il permet d'estimer la capacité thermique des cloisons intérieures afin de prendre en compte son impact sur le comportement thermique du bâtiment. Il est d'autre part associé à un local type, définissant la profondeur et la largeur type des locaux attenants à la façade ; il permet de définir une zone d'intérêt au regard de l'éclairage naturel et de caractériser sur celle-ci l'ouverture sur l'extérieur.

Le modèle d'enveloppe définit les paramètres physiques des parois opaques et vitrées. Il est associé à un vitrage, un plancher, une toiture et des parois verticales types. Chaque paroi type est constituée par différentes couches de matériaux, caractérisées chacune par une épaisseur, une capacité et une conductivité thermique; ce qui permet l'estimation des transferts thermiques au travers de l'enveloppe.

Le scénario annuel d'occupation définit le nombre maximal d'occupants dans le bâtiment, leurs 52 profils de présence hebdomadaires et la puissance dégagée par chacun d'eux ; il permet d'estimer la chaleur dégagée par les occupants à chaque pas de temps. De même, les scénarios de modulation permettent d'estimer à chaque pas de temps les apports énergétiques internes dus à l'éclairage artificiel et à l'usage des équipements ménagers. Le scénario de ventilation définit à chaque pas de temps le débit de renouvellement d'air mécanique et le rendement de récupération de chaleur sur l'air extrait ; il permet d'estimer les transferts de chaleur par renouvellement. Le scénario annuel de régulation des équipements de chauffage et de climatisation définit à chaque pas de temps les températures limites à l'intérieur du bâtiment.

Pour une zone climatique donnée, le MOE-U peut donc sur bases de 3 paramètres : (1) définir l'ensemble des attributs sémantiques nécessaires à l'estimation du comportement thermique des bâtiments ; (2) caractériser la visibilité de l'extérieur sur une zone d'intérêt au regard de l'accès à l'éclairage naturel.


Figure 2.23. Diagramme de classe – définition des usages

# 2.6 Conclusion

Un projet d'aménagement se structure en trois grands niveaux de définition : le *plan guide*, le pl*an masse* et le *plan d'îlot*. La géométrie extérieure du projet est définie dans le plan masse. A cette étape le manque de données ne permet qu'une analyse succincte des aspects thermiques et lumineux. Il apparaît toutefois possible d'estimer, pour une *zone climatique* donnée, un certain nombre de variables de conception, conditionnées par l'*usage*, le *standard de performance* et la *typologie de structure* des bâtiments.

Nous établissons les liens entre ces trois paramètres et les attributs sémantiques nécessaires à la modélisation thermique et de l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments. Pour une zone climatique donnée, sont associés à chaque combinaison *usage, standard de performance* et *typologie de structure* des hypothèses sur : (1) l'occupation des bâtiments, décrite par un *scénario annuel d'occupation*; (2) l'usage des équipements ménagers et de l'éclairage, par des *scénarios annuels de modulation*; (3) la régulation des équipements de chauffage et de climatisation, par un *scénario annuel de régulation*; (4) le type de système et le profil de modulation pour la ventilation mécanique, décrite par un *scénario annuel de ventilation*; (5) le dessin intérieur, par *un modèle d'aménagement intérieur*; (6) l'enveloppe des bâtiments, par un *modèle d'enveloppe*.

La BDD proposée permet d'atteindre sur bases de trois paramètres un niveau de détail permettant une analyse plus fine des besoins énergétiques, de l'accès à la lumière et des conditions de confort thermique. Ce chapitre en décrit l'architecture et les attributs sémantiques retenus pour la description des différents bâtiments du projet. Une BDD propre aux zones climatiques de la réglementation thermique française a été développée suivant ces principes dans le cadre du projet SERVEAU et implantée dans le logiciel SaneCity. Ces résultats sont cependant confidentiels et ne peuvent donc être exposés ici.

Le projet urbain évolue au cours de son avancement, notamment sous l'impulsion des équipes de MOE en charge de la réalisation des différents lots du projet. Les paramètres retenus dans la BDD diffèrent souvent de la solution mise en œuvre au plan d'îlots ; ils permettent toutefois au MOE-U de comparer différents scénarios d'aménagement sur une base de référence. La BDD est par ailleurs *ouverte* et le MOE-U est en mesure d'affiner en collaboration avec le MOE les attributs caractéristiques des différents bâtiments projetés afin de garantir la cohérence globale du projet.

La littérature scientifique fait état de différents modèles et indicateurs pour l'évaluation des conditions d'éclairage naturel dans un intérieur, des besoins énergétiques et des conditions de confort thermique extérieur. Ces derniers sont notamment liés à l'exposition des bâtiments aux rayonnements solaire et de la voûte céleste. Nous analysons dans les chapitres suivants la distribution de la lumière et de l'énergie sur la voûte céleste et les surfaces extérieures afin de donner des indications au MOE-U sur les implantations et orientations à privilégier à partir des données connues et supposées à l'étape du plan masse.

# 3 Caractérisation des conditions d'éclairage naturel à l'étape du plan masse

# 3.1 Introduction

Comment permettre la caractérisation des conditions d'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments par le MOE-U dès l'étape du plan masse, au moment de la réflexion sur la géométrie extérieure du projet ? Le dessin et l'aménagement intérieur des bâtiments, les détails architecturaux tels que la forme et la position des fenêtres, le type de protections solaires ou encore la couleur des revêtements intérieurs ne sont pas définis avant le plan d'îlots. (Nahon, 2015) montrent l'impact de ces variables sur les conditions d'éclairage naturel dans un intérieur, comment donc prendre en compte cet aspect dès le plan masse ?

La lumière naturelle a pour sources principales le soleil (direct) et la voûte céleste (diffus). (Beckers, 2009) montre comment le *sky factor*, rapport de l'angle solide du ciel visible sur celui de la voûte complète, permet la prise en compte de la lumière diffuse dans la conception architecturale. Un autre indicateur statique, le *daylight factor*, défini comme le rapport de l'éclairement intérieur et extérieur d'un bâtiment sous le ciel couvert de la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), reste aujourd'hui le plus utilisé pour la caractérisation de l'accès à la lumière naturelle dans un intérieur.

La lumière n'est cependant pas répartie de façon uniforme sur la voûte céleste et dépend fortement de la position du soleil et du couvert nuageux. (Perez, 1993) proposent un modèle permettant d'estimer pour un lieu donné la *luminance*, le rapport de l'intensité lumineuse [cd] d'une source et de sa surface, des différentes régions du ciel sur un pas de temps horaire. (Reinhart, 2011) et (Nabil, 2005) montrent la nécessité de recourir à des indicateurs dynamiques, s'appuyant sur ces répartitions. Ils proposent respectivement le *Daylight Autonomy* (*DA*) et le *Useful Daylight Indicator* (*UDI*). Le *DA* correspond au pourcentage des heures occupées de l'année au cours desquelles l'éclairage naturel seul permet un niveau d'éclairement supérieur à 500 lux ; l'*UDI* au pourcentage des heures occupées de l'année avec un niveau d'éclairement compris entre 100 et 2000 lux.

L'IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) s'est inspirée de l'*UDI* et du *DA* pour le développement du *Spatial Daylight Autonomy* (*sDA*) et de l'*Annual Sun Exposure* (*ASE*), repris dans les critères de certification LEEDv4 (Leadership in Energy and Environmental Design, 2013). Le *sDA* est défini comme le pourcentage de la surface plancher avec un niveau d'éclairement compris entre 300 et 3000 lux au moins 50% de l'année. L'*ASE* est définie comme le pourcentage de la surface plancher recevant plus de 1000 lux durant au moins 250 heures au cours de l'année. Un bâtiment sera crédité de 2 points si le *sDA* est obtenu sur au moins 50% de la surface plancher, de 3 points sur 75%. L'*ASE* doit être limité à 10% de la surface plancher.

(Ihm, 2009) proposent un modèle pour l'estimation des économies en éclairage artificiel basé essentiellement sur deux paramètres : (1) la part des heures d'une année pour laquelle l'éclairage naturel permet d'atteindre le niveau d'éclairement désiré ; (2) la stratégie de contrôle de l'éclairage artificiel. Pour une stratégie de contrôle donnée, il est donc possible d'estimer directement les consommations d'éclairage artificiel d'un projet d'aménagement en se basant sur l'*UDI*, le *DA* ou le *sDA* à l'intérieur des bâtiments.

Ces derniers indicateurs prennent en compte la lumière réfléchie par les surfaces extérieures et intérieures sur le plan de travail ; ils impliquent notamment la description la géométrie intérieure des bâtiments et ne sont généralement pas utilisés avant le plan d'îlots. Le but de ce chapitre est d'établir un lien entre l'environnement lumineux extérieur et l'*UDI* et le *DA* à l'intérieur des bâtiments afin de

permettre le recours à ce type d'indicateur dès l'étape du plan masse. Les travaux présentés ici constituent une extension de ceux publiés dans (Nahon, 2017).

# 3.2 Modélisation de l'éclairage naturel : Etat de l'art

Les résultats présentés dans la suite de ce chapitre sont obtenus à partir d'une routine Matlab<sup>®</sup> développé 'ad hoc'. Nous présentons dans ce paragraphe les modèles utilisés.

Nous utilisons dans la suite de cette thèse les fichiers de données climatiques fournis par le département de l'énergie des Etats-Unis, disponibles gratuitement sur le site de l'application EnergyPlus (Crawley, 1999, <u>https://energyplus.net</u>) pour plus de 2100 villes dans le monde. Ces données correspondent pour chaque localisation à une année standard; elles sont issues d'une vingtaine de sources différentes et sont le résultat du traitement statistique de 10 à 30 années de mesures.

## 3.2.1 Discrétisation de la voute céleste

La première étape de la modélisation de l'éclairage naturel est le *tuilage du ciel* ; la voûte céleste est divisée en *tuiles* de luminance constante. (Beckers, 2014b) proposent une méthode pour la partition de la voûte céleste permettant notamment de définir manuellement le nombre *Ncell* de tuiles de ciels désiré. Les tuiles obtenues ont le même *angle solide*, le rapport entre la surface de la projection d'un objet sur une sphère et le carré du rayon de celle-ci, et sont délimités par des parallèles et des méridiens, ce qui facilite la navigation entre les tuiles et le calcul du *facteur de vue du ciel*, la fraction de ciel visible depuis une surface donnée, pondérée par le cosinus de la direction considérée.

Une étape importante du tuilage de ciel est la détermination du nombre de tuiles sur chaque anneau de l'hémisphère, de façon à obtenir des tuiles ayant un rapport d'aspect le plus proche possible de 1. Soit *nucel* le vecteur indiquant pour chaque anneau de l'hémisphère le nombre cumulé de tuiles de ciel. (Tregenza, 2011) propose une partition de la voûte céleste en 145 tuiles suivant la séquence nucel = [1 7 19 37 61 85 115 145]. Il obtient ainsi un dôme très régulier, comptant une tuile zénithale, 6(= 7 - 1) tuiles dans le 1<sup>er</sup> anneau, 12 tuiles dans le second, etc. La séquence obtenue suivant (Beckers, 2014b) est différente : nucel = [1 8 20 38 60 86 115 145]. On obtient ainsi un dôme asymétrique mais un rapport d'aspect plus proche de 1 pour chacune des tuiles.

La précision apportée par une partition en 145 tuiles de ciel peut s'avérer insuffisante pour certaines applications ; (Beckers, 2014b) a par exemple montré les avantages d'un dôme comptant 20 000 tuiles, qui permettrait notamment de placer le soleil dans une tuile à chaque pas de temps tout en limitant les problèmes d'aliasing. La Figure 3.1 illustre le tuilage obtenu pour 145, 500 et 5000 tuiles. le Tableau 3.1 indique les séquences obtenues suivant (Beckers, 2014b) pour différents nombres de tuiles de ciel.



Figure 3.1 Exemple de partition de la voûte céleste en 145, 500 et 5000 tuiles

<u>Ncell</u>	<u>Séque</u>	nce <i>nuc</i>	<u>el</u>									
69	[1	4	14	29	48	69]						
145	[1	8	20	38	60	86	115	145]				
156	[1	11	25	44	68	95	125	156]				
250	[1	11	26	46	71	101	135	172	211	250]		
20 000	[1	8	21	41	67	99	137	182	233	290	353	422
		498	580	668	762	862	968	1080	1198	1322	1452	
		1587	1728	1875	2028	2186	2350	2520	2695	2875	3061	
		3252	3448	3650	3857	4069	4286	4508	4735	4966	5202	
		5443	5688	5938	6192	6451	6714	6981	7252	7527	7806	
		8089	8376	8666	8960	9257	9558	9862	10169	10479	10792	
		11108	11427	11749	12073	12400	12729	13060	13394	13730	14068	
		14407	14748	15091	15435	15781	16128	16476	16825	17175	17526	
		17878	18231	18584	18938	19292	19646	20000]				

Tableau 3.1. Séquences nucel pour une partition en Ncell tuiles de ciel

Chaque tuile est caractérisée par la latitude et la longitude de son centre et un angle solide constant  $d\Omega = \frac{2\pi}{Ncell}$ .

## 3.2.2 Calcul de la position du soleil

La luminance de chacune des tuiles de ciel ainsi obtenues dépend notamment de la position du soleil. Cette dernière varie dans le temps du fait de la rotation de la terre sur elle-même et autour du soleil. La rotation de la terre sur elle-même peut être considérée uniforme et caractérisée par une période de 24h. La rotation de la terre autour du soleil ne peut être considérée uniforme en raison de l'inclinaison de son axe sur le plan orbital et de la trajectoire elliptique de son orbite. On parle d'obliquité et d'ellipticité.

(Beckers, 2010) décrit les étapes nécessaires pour le calcul de la position du Soleil, caractérisée à chaque pas de temps par son *angle zénithal*  $\theta_z$ , l'angle entre le rayon du Soleil et l'axe de rotation de la Terre, et son *azimut*  $\gamma_z$ , l'angle entre le rayon du Soleil rapporté sur le plan horizontal et le Sud.

Cette méthode repose sur la résolution de l'équation de Kepler. On obtient ainsi à chaque pas de temps les valeurs de :

- ν : l'anomalie vraie [°], angle formé par la direction Terre-Soleil et la ligne des apsides ;
- *M* : anomalie moyenne [°], angle formé par la direction Terre-Soleil en supposant une rotation uniforme ;
- $\lambda_{sun}$  : la longitude du soleil [°] ;
- $\varphi_{AD}$  : l'ascension droite du soleil.

On calcule à partir de ces valeurs les décalages R et C [min] caractérisant l'obliquité et l'ellipticité de la rotation de la Terre autour du Soleil :

$$C = (v - M) \times 60/15$$
Équation 3.1 $R = (\varphi_{AD} - \lambda_{sun}) \times 60/15$ Équation 3.2

La Figure 3.2 illustre le décalage E = R + C [min] dû à la non uniformité de la rotation de la Terre autour du Soleil pour l'année 2010 à Paris :



Figure 3.2 Equation du temps

Les fichiers de données climatiques sont renseignés suivant l'heure légale ; la méthode proposée permet d'obtenir la position du soleil à partir de l'heure solaire. Il convient donc d'établir à chaque pas de temps la correction nécessaire pour passer de l'une à l'autre. L'heure légale est définie pour un fuseau horaire donné. Le décalage  $S_R$  en minutes entre un point à la longitude  $\lambda$  et le fuseau horaire  $n_{fus}$  compté positivement vers l'Est s'obtient de la façon suivante :

$$S_R = n_{fus} \times 15 - \lambda$$
 Équation 3.3

On peut calculer l'heure solaire  $h_{sun}$  à partir de l'heure légale h suivant la formule :

$$h_{sun} = h - 1$$
 (2 à l'heure d'été)  $-S_R - E$  Équation 3.4

### 3.2.3 Calcul de la luminance des tuiles de ciel

(Perez, 1993) proposent un modèle permettant d'estimer la luminance du ciel dans une direction donnée en fonction de la position du soleil et du couvert nuageux, caractérisé par le rapport entre les irradiances directe sur un plan normal aux rayons du soleil et diffuse sur un plan horizontal. Ce modèle repose sur les huit catégories de ciel (*bin*) de couvert (*bin* = 1) à dégagé (*bin* = 8), définies par (Perez, 1990) en fonction de l'indicateur de clarté  $\epsilon$  défini ci-après :

$$\epsilon = \frac{\frac{Id_h + Ib_n}{Id_h} + 1.041 \times \theta_z^3}{1 + 1.041 \times \theta_z^3}$$
 Équation 3.5

Avec  $Ib_n$  et  $Id_h$  respectivement les irradiances directe sur un plan normal aux rayons du soleil et diffuse sur un plan horizontal.

Le Tableau 3.2 établit la correspondance entre la catégorie de ciel *bin* et l'indicateur de clarté  $\epsilon$ .

	limite	limite
	inférieure	supérieure
1. Couvert	1.000	1.065
2.	1.065	1.230
3.	1.230	1.500
4.	1.500	1.950
5.	1.950	2.800
6.	2.800	4.500
7.	4.500	6.200
8. Dégagé	6.200	

Tableau 3.2. Catégories de ciel

La luminosité du ciel est caractérisée par l'indicateur  $\Delta$  :

$$\Delta = \frac{m \, Id_h}{G_{on}}$$
 Équation 3.6

Avec *m* la masse optique de l'air, que nous estimons suivant la formule proposée par (Young, 1994) (cf. Équation 3.7) et  $G_{on}$  le rayonnement solaire extra-atmosphérique, que nous estimons suivant la formule proposée par (Spencer, 1971) (cf. Équation 3.8).

$$m = \frac{e^{-0.000184 \times alt}}{\cos(\theta_z) + 0.5057 \times (96.07995 - \theta_z)^{-1.634}}$$
 Équation 3.7

Avec alt [m] l'altitude du point considérée.

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{n * 360}{365}\right) \right)$$
 Équation 3.8

Avec  $G_{sc} = 1367 \text{ [W/m^2]}$  la constante solaire, telle que définie par le World Radiation Center et n le numéro du jour de l'année.

La luminance du ciel dans une direction donnée est fonction des paramètres a, b, c, d et e, euxmêmes dépendant de  $\epsilon$  et  $\Delta$ . Ces paramètres sont calculés de façon analogue, à partir de la formule suivante :

$$x = x_1(bin) + x_2(bin) \times \theta_z + \Delta[x_3(bin) + x_4(bin) \times \theta_z]$$
 Équation 3.9

Dans le cas où bin = 1 (ciel uniformément couvert), les valeurs des coefficients c et d sont calculées selon les formules suivantes :

$$c = \exp[(\Delta(c_1 + c_2 \times \theta_z))^{c_3}] - c_4 \qquad \text{Équation 3.10}$$

$$d = -\exp[(\Delta(d_1 + d_2 \times \theta_z))] + d_3 + \Delta \times d_4]$$
 Équation 3.11

Les valeurs des coefficients  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$  et  $e_i$  sont issues de données expérimentales recueillies à partir de plus de 16 000 scans de ciel entre juin 1985 et décembre 1986 à Berkeley, en Californie. Le Tableau 3.3 reprend les valeurs proposées par (Perez, 1993, Table 1, p.239) pour chacun de ces paramètres.

	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4
1. Couvert	1.3525	-0.2576	-0.2690	-1.4366	-0.7670	0.0007	1.2734	-0.1233
2.	-1.2219	-0.7730	1.4148	1.1016	-0.2054	0.0367	-3.9128	0.9156
3.	-1.1000	-0.2515	0.8952	0.0156	0.2782	-0.1812	-4.5000	1.1766
4.	-0.5484	-0.6654	-0.2672	0.7117	0.7234	-0.6219	-5.6812	2.6297
5.	-0.6000	-0.3566	-2.5000	2.3250	0.2937	0.0496	-5.6812	1.8415
6.	-1.0156	-0.3670	1.0078	1.4051	0.2875	-0.5328	-3.8500	3.3750
7.	-1.0000	0.0211	0.5025	-0.5119	-0.3000	0.1922	0.7023	-1.6317
8. Dégagé	-1.0500	0.0289	0.4260	0.3590	-0.3250	0.1156	0.7781	0.0025
	c1	c2	c3	c4	dl	d2	d3	d4
1. Couvert	2.8000	0.6004	1.2375	1.0000	1.8734	0.6297	0.9738	0.2809
2.	6.9750	0.1774	6.4477	-0.1239	-1.5798	-0.5081	-1.7812	0.1080
3.	24.7219	-13.0812	-37.7000	34.8438	-5.0000	1.5218	3.9229	-2.6204
4.	33.3389	-18.3000	-62.2500	52.0781	-3.5000	0.0016	1.1477	0.1062
5.	21.0000	-4.7656	-21.5906	7.2492	-3.5000	-0.1554	1.4062	0.3988
6.	14.0000	-0.9999	-7.1406	7.5469	-3.4000	-0.1078	-1.0750	1.5702
7.	19.0000	-5.0000	1.2438	-1.9094	-4.0000	0.0250	0.3844	0.2656
8. Dégagé	31.0625	-14.5000	-46.1148	55.3750	-7.2312	0.4050	13.3500	0.6234
	e1	e2	e3	e4				
1. Couvert	0.0356	-0.1246	-0.5718	0.9938				
2.	0.2624	0.0672	-0.2190	-0.4285				
3.	-0.0156	0.1597	0.4199	-0.5562				
4.	0.4659	-0.3296	-0.0876	-0.0329				
5.	0.0032	0.0766	-0.0656	-0.1294				
6.	-0.0672	0.4016	0.3017	-0.4844				
7.	1.0468	-0.3788	-2.4517	1.4656				
8. Dégagé	1.5000	-0.6426	1.8564	0.5636				

Tableau 3.3. Valeurs des coefficients  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$  et  $e_i$ 

Le paramètre *a* traduit l'écart entre la luminance de l'horizon et celle du zénith ; pour des valeurs négatives de *a* la luminance est plus importante au zénith et inversement pour des valeurs positives ; plus |a| est important, plus l'écart est grand :



Figure 3.3. Influence du coefficient a sur la distribution de la luminance (Perez, 1993, Fig. 1)

Le paramètre *b* influe sur le gradient de luminance pour des angles zénithaux importants ; plus |b| est grand, plus la luminance relative est importante à l'horizon :



Figure 3.4. Influence du coefficient b sur la distribution de la luminance (Perez, 1993, Fig. 2)

Le paramètre c influe sur la luminance diffuse au niveau de la position du soleil ; plus c ets important, plus la luminance du ciel est importante dans la direction du soleil :



Figure 3.5. Influence du coefficient c sur la distribution de la luminance (Perez, 1993, Fig. 3)

Le paramètre d influe sur l'étendue de la tâche solaire sur la voûte céleste ; plus |d| est important plus la luminance est importante au voisinage de la direction du soleil :



Figure 3.6. Influence du coefficient d sur la distribution de la luminance (Perez, 1993, Fig. 4)

(Perez, 1993) introduisent la notion de *luminance relative* lv, définie comme le rapport de la luminance dans une direction donnée et de celle d'une direction de référence définie de façon arbitraire :

$$lv(\zeta,\gamma) = \left[1 + a \exp\left(\frac{b}{\cos(\zeta)}\right)\right] \times \left[1 + c \exp(d\gamma) + e \cos^2(\gamma)\right]$$
 Équation 3.12

Avec  $\zeta$  l'angle zénithal de la direction considérée et  $\gamma$  l'angle entre la direction considérée et celle des rayons du soleil.

La luminance  $Lv(\zeta, \gamma)$  [W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>] du ciel dans une direction donnée est estimée à partir de sa luminance relative  $lv(\zeta, \gamma)$  et de l'éclairement (ou illuminance) diffus sur un plan horizontal  $Ed_h$ :

$$Lv(\zeta,\gamma) = Ed_h \frac{lv(\zeta,\gamma)}{\int_{\omega \in 2\pi} cos(\zeta) \ lv(\zeta,\gamma) \ d\omega}$$
 Équation 3.13

On considère constante la luminance sur chacune des tuiles de ciel issues de notre partition de la voûte céleste, égale à celle de la direction de son centre. L'Équation 3.13 devient :

$$Lv = Ed_{h} \frac{lv(\zeta, \gamma)}{\sum_{Ncell} cos(\zeta) \ lv(\zeta, \gamma) \ d\Omega}$$
 Équation 3.14

Les données les plus fréquemment disponibles sur le rayonnement solaire sont les irradiances directes et diffuses [W/m<sup>2</sup>]. Pour l'étude des conditions d'éclairage naturel, il convient de convertir ces données en éclairement (ou illuminance) [lux] par le recours à un modèle d'efficacité lumineuse.

### 3.2.4 Modèle d'efficacité lumineuse

L'œil humain perçoit uniquement le rayonnement dans le spectre visible de 380 à 780nm. La courbe photopique de l'œil humain traduit sa sensibilité au rayonnement en fonction de sa longueur d'onde :



Figure 3.7. Courbe photopique de l'œil humain et spectre solaire (Perez, 1990, Fig. 1, p. 272)

(Perez, 1990) proposent un modèle d'efficacité lumineuse pour la conversion des irradiances directes  $K_{dir}$  et diffuses  $K_{dif}$  en illuminances :

$$K_{dir} = a_i + b_i * W + c_i * e^{5.73 * \theta_z - 5} + d_i * \Delta$$
 Équation 3.15

$$K_{dif} = a_i + b_i * W + c_i * \cos(\theta_z) + d_i * \ln(\Delta)$$
 Équation 3.16

Avec W la quantité d'eau précipitable [cm] (cf. Équation 3.17) et  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  et  $d_i$  les coefficients d'efficacité lumineuses directe et diffuse (cf. Tableau 3.4).

La quantité d'eau précipitable [cm] n'est pas directement renseignée dans le fichier de données climatiques et est estimée à partir de la formule proposée par (Perez, 1990) :

22/02/2018

$$W = exp(0.07.Td - 0.075)$$

Avec *Td* la température de rosée [°C]

Le Tableau 3.4 récapitule les coefficients d'efficacité lumineuse directe et diffuse  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  et  $d_i$  proposés par (Perez, 1990, Table 4, p. 278), obtenus par la méthode des moindres carrés à partir de plus de 20 000 mesures :

		Dir	ect		Diffuse			
bin	а	b	С	d	а	b	С	d
1	57.20	-4.55	-2.98	117.12	97.24	-0.46	12.00	-8.91
2	98.99	-3.46	-1.21	12.38	107.22	1.15	0.59	-3.95
3	109.83	-4.90	-1.71	-8.81	104.97	2.96	-5.53	-8.77
4	110.34	-5.84	-1.99	-4.56	102.39	5.59	-13.95	-13.90
5	106.36	-3.97	-1.75	-6.16	100.71	5.94	-22.75	-23.74
6	107.19	-1.25	-1.51	-26.73	106.42	3.83	-36.15	-28.83
7	105.75	0.77	-1.26	-34.44	141.88	1.90	-53.24	-14.03
8	101.18	1.58	-1.10	-8.29	152.23	0.35	-45.27	-7.98

Tableau 3.4. Coefficients d'efficacité lumineuse directe et diffuse  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  et  $d_i$ 

## 3.2.5 Maillage de la géométrie

La réalisation des calculs physiques nécessite un maillage des éléments du modèle géométrique : les différentes surfaces du modèle sont subdivisées en *mailles* dont l'éclairement est supposé constant et estimé par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs points de calcul. Nous choisissons d'estimer le flux reçu sur chacune des mailles suivant la méthode d'intégration de quadrature de Gauss : on remplace le calcul d'une intégrale sur la maille considérée par la somme pondérée sur certains de ses points. L'intérêt principal de cette méthode réside dans le fait que la position des points d'intégration est calculée de façon à obtenir la meilleure précision atteignable pour un nombre de points donné.

Les géométries obtenues à partir des différentes typologies présentées dans le chapitre précédent sont uniquement composées de quadrilatères et de triangles. Le maillage de ce type de forme géométrique peut s'effectuer par carreau de Coons : le modèle géométrique est uniquement constitué de quadrilatères éventuellement dégénérés en triangles. Nous choisissons de recourir à cette méthode qui permet l'obtention d'un maillage structuré et ordonné.

### 3.2.5.1 Définition des carreaux de Coons

Soit un quadrilatère quelconque défini par ses 4 sommets :

$$Q = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & \dots & \dots \\ x_3 & \dots & \dots \\ x_4 & \dots & z_4 \end{bmatrix}$$
 Équation 3.18

Dans le cas d'un quadrilatère dégénéré en triangle, on retient la convention P4 = P3.

Le carreau est défini comme un point dont la position varie suivant une fonction de mélange, c'est-àdire comme une combinaison barycentrique des 4 sommets du quadrilatère (Foley, 2009 ; Zienkiewicz, 1971).

P = FQ Équation 3.19

Les fonctions de mélange relatives aux quatre sommets sont des fonctions de deux paramètres *s* et *t* compris entre 0 et 1 :

$$F = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-s)(1-t) & s(1-t) & st & (1-s)t \end{bmatrix}$$
 Équation 3.20

L'ensemble de ces fonctions constitue une combinaison barycentrique :

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = 1$$
 Équation 3.21

En écrivant cette expression de manière plus explicite, on remarque que le point est fonction des deux paramètres *s* et *t*.

$$P(s,t) = \begin{bmatrix} x(s,t) & y(s,t) & z(s,t) \end{bmatrix} = FQ$$
 Équation 3.22

Le calcul des dérivées est immédiat :

$$\frac{\partial P}{\partial s} = \frac{\partial F}{\partial s}Q \quad ; \quad \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial t}Q \qquad \text{Équation 3.23}$$

Les dérivées des fonctions de forme s'écrivent :

$$\frac{\partial F}{\partial s} = \begin{bmatrix} -(1-t) & (1-t) & t & -t \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \begin{bmatrix} -(1-s) & -s & s & (1-s) \end{bmatrix}$$
Équation 3.24

Pour effectuer un changement de coordonnées, des cartésiennes vers les paramétriques ou vice versa, il faut calculer le jacobien de la transformation. :

$$J = \left\| \frac{\partial P}{\partial s} \times \frac{\partial P}{\partial t} \right\|$$
 Équation 3.25

En développant, on obtient :

$$\frac{\partial P}{\partial s} \times \frac{\partial P}{\partial t} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial z}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \frac{\partial x}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial z}{\partial t} & \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial y}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix}$$
 Équation 3.26

Et finalement le déterminant du jacobien :

$$J(s,t) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial s}\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{\partial y}{\partial t}\frac{\partial z}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial s}\frac{\partial x}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial s}\frac{\partial z}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial s}\frac{\partial y}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t}\frac{\partial y}{\partial s}\right)^2} \qquad \text{Équation 3.27}$$

L'intégrale sur le carreau d'une fonction g exprimée en fonction des deux paramètres s et t qui le décrivent, s'écrit donc :

$$\iint_{P} gdP = \iint_{P} g(s,t) \cdot J(s,t)$$
 Équation 3.28

Cette intégrale doit être calculée numériquement, car son jacobien ne peut pas l'être facilement (voir (Zienkiewicz, 1971, p. 144 à 153) ou (Beckers, 2012, p. 230, table 10.7)). La fonction *g* est quelconque et doit simplement pouvoir être calculée aux points de Gauss.

### 3.2.5.2 Position et pondération des points de Gauss

La position et le poids des points de Gauss sur un carreau de Coons dépendent du nombre de points désiré. Le Tableau 3.5 reprend les valeurs des paramètres *s* et *t* et le poids associés à chacun des points de Gauss pour 1, 4, 9 et 16 points.

22/02/2018

Nombre de points	Position	Poids
1	s = 0.5 et $t = 0.5$	p = 1
4	$s = \begin{bmatrix} 0.5 - \frac{\sqrt{3}}{6} & 0.5 + \frac{\sqrt{3}}{6} & 0.5 + \frac{\sqrt{3}}{6} & 0.5 + \frac{\sqrt{3}}{6} \end{bmatrix}$ $t = \begin{bmatrix} 0.5 - \frac{\sqrt{3}}{6} & 0.5 - \frac{\sqrt{3}}{6} & 0.5 + \frac{\sqrt{3}}{6} & 0.5 + \frac{\sqrt{3}}{6} \end{bmatrix}$	p=1/4 pour l'ensemble des points de Gauss
9	$s = \begin{bmatrix} 0.5 - \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 & 0.5 + \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 - \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 \cdots \\ & \cdots & 0.5 + \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 - \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 & 0.5 + \sqrt{\frac{3}{20}} \end{bmatrix}$ $t = \begin{bmatrix} 0.5 - \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 - \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 - \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 - \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 & 0.5 \cdots \\ & \cdots & 0.5 & 0.5 + \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 + \sqrt{\frac{3}{20}} & 0.5 + \sqrt{\frac{3}{20}} \end{bmatrix}$	$p = \begin{bmatrix} aa & ba & aa & ab & bb \dots \\ \dots & ab & aa & ba & aa \end{bmatrix}$ $Avec: a = \frac{5}{18} et b = \frac{4}{9}$
16	$s = [ba \ aa \ ab \ bb \ ba \ aa \ ab \ bb \ ba \ aa \ ab \ bb \ ba \ aa \ ab \ bb \ bb \ bb \ bb]$ $t = [ba \ ba \ ba \ ba \ aa \ aa \ aa \ aa $	$p = [aa \ ba \ ba \ aa \ ab \ bb \ bb \ ab \dots \\ \ ab \ bb \ bb \ ab \ aa \ ba \ ba $

Tableau 3.5. Positions et poids des points de Gauss sur un carreau de Coons

# 3.2.5.3 Contrôle de la taille des différentes mailles

La précision obtenue dépend du nombre de points de Gauss mais aussi de la taille des mailles considérées : le calcul de l'irradiance sur une maille n'est pas continu du fait de la visibilité du soleil, du ciel et des surfaces extérieures depuis la surface considérée. Il est donc important de contrôler les dimensions de ces mailles. Pour ce faire elles sont subdivisées suivant un critère de taille.

On définit la taille maximale *dmax* des côtés de chacun des carreaux de Coons composant le modèle géométrique. Le modèle géométrique ne contient que des quadrilatères de la forme :

$$Q = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & \dots & \dots \\ x_3 & \dots & \dots \\ x_4 & \dots & z_4 \end{bmatrix}$$

On contrôle la taille d1 et d2 des segments [P1-P2] et [P1-P4] de chacun des quadrilatères : dans le cas où d1 et d2 sont respectivement x et y fois supérieurs à *dmax*, on segmente [P1-P2] en X segments et [P1-P4] en Y segments, avec X et Y respectivement les plus petits entiers inférieurs ou égaux à x et y. Pour ce faire on utilise les fonctions de mélange propres aux carreaux de Coons :

- t nous permet de nous déplacer dans le sens de [P1-P2],
- *s* dans le sens de [P1-P4].

On créée ainsi les nouveaux nœuds et topologie définissant notre maillage.

### 3.2.6 Calcul des illuminances

#### 3.2.6.1 Diffuses

L'illuminance diffuse Id [W/m<sup>2</sup>] est obtenue à partir de la luminance relative du ciel telle que définie dans les paragraphes précédents (cf. Équation 3.14) suivant :

Avec  $\theta$  [°] l'angle entre la normale au point considéré et la direction  $\omega$ ,  $vis(\omega)$  la visibilité (0 ou 1) et  $Lv(\omega)$  du ciel dans la direction  $\omega$  depuis le point considéré.

On considère constante la luminance de chacune des tuiles de ciel issues de la partition de la voûte céleste, égale à celle de la direction de son centre. L'Équation 3.29 peut donc s'écrire :

$$Id = \sum_{Ncell} cos(\theta) \cdot vis(\omega) \cdot Lv \cdot d\Omega \qquad \qquad \text{Équation 3.30}$$

### 3.2.6.2 Directes

Le rayonnement direct peut-être traité indépendamment ou conjointement au rayonnement diffus. Dans le premier cas, on détermine le vecteur *rsun* de position du soleil à chaque pas de temps à partir de son angle zénithal  $\theta_z$  et de son azimut  $\gamma_z$ :

$$rsun = [-\sin(\gamma_z) \cdot \sin(\theta_z) - \cos(\gamma_z) \cdot \sin(\theta_z) \cos(\theta_z)]$$
 Équation 3.31

L'irradiance directe *Ib* [W/m<sup>2</sup>] sur les différents points de calculs issus du maillage du modèle géométriques est obtenue à partir de la formule suivante :

$$Ib = Ib_n \cdot ps \cdot vis$$
 Équation 3.32

Avec ps le produit scalaire entre les vecteur rsun et normal au point de calcul ; vis la visibilité (0 ou 1) du soleil depuis le point considéré.

Dans le second cas, on détermine la tuile de ciel dans laquelle se trouve le soleil pour un pas de temps donné. Rappelons que la méthode retenue pour le tuilage du ciel permet d'obtenir des tuiles délimitées par des latitudes et des longitudes ;  $\theta_z$  permet donc de définir l'anneau et  $\gamma_z$  la tuile de cet anneau dans laquelle se trouve le soleil à un pas de temps donné.

La luminance directe  $Lv_b$  [W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>] est obtenue à partir de la formule suivante :

$$Lv_b = \frac{Ib_n}{d\Omega}$$
 Équation 3.33

*Ib* est ensuite obtenue de façon analogue à *Id* :

$$Ib = \sum_{Ncell} cos(\theta) \cdot vis(\omega) \cdot Lv_b \cdot d\Omega \qquad \qquad \text{Équation 3.34}$$

La première méthode est la plus précise, la direction exacte du soleil étant considérée à chaque pas de temps.

La seconde méthode présente l'avantage de limiter les tests de visibilité et donc les durées de calcul; on établit les matrices de visibilité des différentes tuiles de ciel depuis chacun des points de calculs issus du maillage une unique fois quel que soit le nombre de pas de temps retenu pour la modélisation. La précision obtenue dépend du nombre de tuiles de ciel, (Nabil, 2005) propose notamment d'utiliser une partition en 5000 éléments afin de limiter le déplacement angulaire entre la direction du soleil et celle du centre de la tuile de ciel qui lui est associée.

# 3.2.6.3 Réfléchies

Le calcul du rayonnement réfléchi par une surface sur une autre peut se faire suivant deux types méthodes :

- la méthode du lancer de rayons (Ward, 1994) et ses nombreuses variantes,
- la méthode de la radiosité.

Les méthodes basées sur le lancer de rayons permettent la prise en compte des réflexions spéculaires : le rayonnement réfléchi dans une direction donnée en fonction de l'angle d'incidence du rayon sur la surface réflectrice, typiquement la réflexion du rayonnement direct par un miroir ou une surface vitrée. Elles induisent cependant un coût de calcul important et ne permettent pas directement la prise en compte des réflexions dites *lambertiennes* : les réflexions diffuses, pour lesquelles l'intensité du rayonnement réfléchi est la même dans toutes les directions de l'espace, typiquement la réflexion des murs.

La radiosité *B* [W/m<sup>2</sup>] est une grandeur physique représentant le flux total émis et réfléchi par une paroi, en tenant compte du rayonnement réfléchi reçu par cette dernière. L'ensemble des réflexions sont considérées lambertiennes et la méthode de la radiosité ne permet pas la prise en compte des réflexions spéculaires. Cette méthode repose sur les *facteurs de vue*  $F_{ij}$  de maille à maille, traduisant la fraction de l'énergie émise par une surface *i* reçue par une surface *j*.

Nous choisissons de recourir à la méthode de la radiosité et les méthodes basées sur le lancer de rayons ne sont pas abordées dans ce paragraphe.  $F_{ij}$  est calculé par intégration sur la maille i du facteur de vue différentiel, ou facteur de vue de point à surface  $F_{dS-j}$ , la fraction de la surface j visible depuis l'élément différentiel dS. Ce-dernier peut être estimé suivant la formule de Lambert telle que citée par (Beckers, 2012, formule 10.44, p.229) :

$$F_{dS-j} = \frac{1}{2\pi} \sum_{j} n \cdot g_j$$
 Équation 3.35

Avec *n* le vecteur normal à l'élément différentiel dS,  $g_j$  les vecteurs normaux des pyramides SPQ, etc. représentés Figure 3.8. Ce calcul est exact dans le cas où la surface *j* est entièrement visible depuis l'élément différentiel dS.



Figure 3.8 (Beckers, 2012, Fig. 10.14, p.229) Calcul des facteurs de vue de point à surface

Le bilan des échanges radiatifs entre tous les couples de maille du modèle géométrique permet d'établir les équations de radiosité (Beckers, 2012, formule 10.23, p. 224):

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \rho_1 F_{11} & \rho_1 F_{12} & \dots & \rho_1 F_{1n} \\ \rho_2 F_{21} & \rho_2 F_{22} & \rho_2 F_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_n F_{n1} & \dots & \dots & \rho_n F_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_n \end{pmatrix}$$
 Équation 3.36

Avec :

- $B_i$  : radiosité : flux réfléchi par la maille i [W/m<sup>2</sup>] ;
- $E_i$ : Excitance : flux initialement réfléchi par la maille i [W/m<sup>2</sup>]
  - Avec:  $E_i = (Id_i + Ib_i) * \rho_i$ ;
- *ρ<sub>i</sub>* : coefficient de réflectivité de la maille *i* ;
- $F_{ij}$ : le facteur de vue de la maille i vers la maille *j*.

Ce système d'équations peut s'écrire sous la forme (Beckers, 2012, formule 10.25, p. 225) :

$$RB = E; R_{ij} = \delta_{ij} - \rho_i F_{ij}$$
 Équation 3.37

Avec :

- *B* : le vecteur des radiosités ;
- *E* : le vecteur des exitances ;
- *R* : matrice de la radiosité ;
- $\delta_{ij}$  : coefficient de la matrice identité (si  $\neq j \ \delta_{ij} = 0$ , sinon  $\delta_{ij} = 1$ ).

L'inversion de la matrice R permet la résolution de ces équations et le calcul du vecteur B des radiosités.

Cette méthode est issue des techniques utilisées pour la production de rendus réalistes et permet le calcul du rayonnement émis par la paroi vers l'œil. On cherche ici à calculer le rayonnement reçu et non émis par la paroi, on divise donc le vecteur des radiosités par le coefficient de réflectivité des différentes parois pour obtenir le rayonnement reçu par chacune des mailles :

$$Ir_i = B_i/\rho_i$$
 Équation 3.38

# 3.3 Modélisation de l'éclairage naturel à l'échelle urbaine

# 3.3.1 Modélisation de l'éclairage naturel à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments

Les modèles décrits ci-dessus permettent de calculer l'illuminance globale (directe, diffuse et réfléchie) d'une surface. Afin d'estimer le *DA* et l'*UDI* à l'intérieur du local, il est nécessaire de calculer à chaque pas de temps l'illuminance global sur le plan de travail.

La modélisation des conditions d'éclairage dans un intérieur s'appuie nécessairement sur un maillage fin des différentes surfaces, généralement d'une dimension caractéristique de 25 à 50 cm (Reinhart, 2006). Cela induit un coût de calcul important, notamment pour l'estimation des facteurs de vue depuis les faces intérieures et le plan de travail. La modélisation de l'éclairement des surfaces extérieures du projet peut s'appuyer sur un maillage plus grossier, avec une dimension caractéristique de 1 à 3 m, et ne nécessite pour information sémantique que la couleur des revêtements extérieurs.

La Figure 3.9 illustre les étapes nécessaires au calcul de l'éclairement des faces extérieures du modèle géométrique ; la Figure 3.10 les étapes nécessaires au calcul de l'éclairement sur un plan horizontal à l'intérieur du local. Pour le cas d'étude proposé dans la suite de ce chapitre, on compte 1335 points de calculs pour la modélisation de l'éclairement à l'intérieur des bâtiments contre seulement 65 pour l'extérieur. Les calculs sont réalisés sur un logiciel développé *'ad hoc'* et non optimisé, on affiche à titre indicatif une durée de 10 secondes pour l'extérieur contre 5 minutes pour l'intérieur, soit un rapport de 30. Dans la perspective de l'analyse des conditions d'éclairage naturel dans un projet d'aménagement pouvant compter plus d'une centaine de bâtiments, il apparaît nécessaire de s'appuyer sur une modélisation se limitant à l'éclairement des surfaces extérieures.



Figure 3.9. Calcul de l'éclairement sur les faces extérieures



Figure 3.10. Calcul de l'éclairement sur un plan à l'intérieur du local

# 3.3.2 Dimension des mailles et nombre de points de Gauss

Le facteur de vue de la maille *j* depuis la maille *i*  $F_{ij}$  est calculé par intégration sur la maille *i* du facteur de vue de point à surface  $F_{dS-j}$  calculés depuis les points de Gauss. La dimension des mailles et le nombre de points de Gauss ont un impact sur la précision des facteurs de vue. (Miguet, 2000) considère un unique point au centre de chaque maille, il indique p. 249 que : « cette simplification reste valable tant que la distance à la surface réceptrice est supérieure à environ 5 fois la dimension maximale de la surface émettrice projetée » :



Figure 3.11 ((Miguet, 2000), Fig.175, p.249) Condition de validité de la méthode de calcul des différents facteurs de vues

Dans le cas où cette condition n'est pas respectée (Miguet, 2000) propose de subdiviser le polygone récepteur et d'effectuer le calcul pour chacune des facettes résultantes. Le facteur de vue obtenu pour le polygone sera la moyenne de celui de chacune des sous-facettes qui le compose.



Figure 3.12 (Miguet, 2000, Fig. 176, p.249) Subdivision des mailles pour le calcul des facteurs de vue

(Miguet, 2000) compare les résultats obtenus pour trois cas tests en utilisant une méthode analytique exacte et la méthode d'intégration sur contour avec et sans vérification de la condition de validité :



Figure 3.13 (Miguet, 2000, Fig.169, p.239)

Technique	Configurations (rappel ci-contre)				
de calcul	1	2	3		
Calcul analytique (valeur exacte)	0,199825	0,003162	0,200044		
Intégration de contour (sans subdivision)	0,239456 + 20 %	0,003173 + 0,35 %	0,190136 - 5 %		
Intégration de contour (avec subdivision)	0,201041 + <b>0,61 %</b>	0,003162 0%	0,199740 - <b>0,15 %</b>		

Figure 3.14 (Miguet, 2000, Fig.178, p.251) Valeurs des facteurs de vue Fij

Ce procédé est correct, mais relativement coûteux en calcul : pour les trois cas présentés, la surface réceptrice *i* est découpée en 5x5 facettes de façon à respecter la condition de validité proposée, soit 25 points de calcul. Une meilleure précision peut être obtenue moyennant un nombre inférieur de points de calcul suivant la méthode de quadrature de Gauss :

		C	Configuration	s
-		1	2	3
	Calcul analytique	0,199825	0,003162	0,200044
de	sans subdivision	0,239818	0,003173	0,190136
tion tour	(1 Pt)	+20,01%	+0,35%	-4,95%
égra: cont	avec subdivision	0,201041	0,003162	0,199740
Inte	(25 Pts)	+0,61%	+0,00%	-0,15%
S	4 Dtc	0,198376	0,003162	0,200406
ature de Gaus	4 Pts	-0,73%	+0,00%	+0,18%
	0 Dtc	0,199844	0,003162	0,200039
	9 PIS	+0,01%	+0,00%	+0,00%
uadr	16 Dtc	0,199826	0,003162	0,200043
ď	10 PIS	+0,00%	+0,00%	+0,00%

Tableau 3.6 Comparaison	n Miguet/quadrature de	Gauss
-------------------------	------------------------	-------

Afin d'évaluer la précision des intégrations numériques par quadrature de Gauss sur un carreau de Coons (un quadrangle éventuellement dégénéré en triangle, cf. § 3.2.5), on effectue des tests avec 1, 4, 9 et 16 points pour différentes configurations :

Nombre de points de Gauss	Exact	1	4 = 2x2	9 = 3x3	16 = 4x4
<b>1.</b> sin( <i>πs</i> )	0.6366	1.0	0.6162	0.6371	0.6366
<b>2.</b> <i>s</i> <sup>3</sup>	0.25	0.125	0.25	0.25	0.25
<b>3.</b> <i>s</i> <sup>5</sup>	0.1667	0.0313	0.1528	0.1667	0.1667
<b>4.</b> <i>s</i> <sup>8</sup>	0.1111	0.0039	0.0748	0.1085	0.1111
<b>5.</b> Carrés c x c distants de .75c	0.2827	0.3577	0.2801	0.2827	0.2827
<b>6.</b> Carrés c x c distants de 2 c	0.0686	0.0735	0.0685	0.0686	0.0686
<b>7.</b> Triangle c x c distant de 2 c	0.0343	0.0367	0.0342	0.0343	0.0343
8. Carreau dégénéré en triangle	0.0343	0.0358	0.0343	0.0343	0.0343
9. Deux carrés perpendiculaires	0.2	0.1901	0.2004	0.2	0.2

Tableau 3.7 : Tests de la quadrature de Gauss

On effectue d'abord des tests de vérification, le premier sur une fonction trigonométrique pour laquelle la quadrature numérique ne peut pas donner une solution exacte, même si elle s'en approche quand on utilise 4 points dans chaque direction (Tableau 3.7).

Dans le second groupe de tests, on intègre des fonctions polynomiales. On obtient une solution exacte à partir d'un nombre suffisant de points. A une dimension, une formule à *n* points est exacte jusqu'à un polynôme de degré 2*n*-1. Toutes les cases comportant des solutions exactes sont sur fond gris (Tableau 3.7). Les valeurs en rouge sont exactes ou proches de la solution exacte.

A partir de la ligne 5 du Tableau 3.7, on effectue des tests sur le calcul du facteur de vue. Celui-ci est calculé par intégration numérique sur le carreau de Coons que nous appelons récepteur, pour une cible qui peut être tout type de polygone non dégénéré.

Pour les calculs de facteurs de vue, on s'intéresse au cas de deux carrés unitaires séparés par un intervalle de 0.75 ou 2. On constate qu'avec deux points de Gauss dans chaque direction, on obtient une très bonne solution. Si on coupe le carré supérieur par une diagonale (ligne 7 du Tableau 3.6) on vérifie que les facteurs de vue sont bien réduits de moitié. Il en est de même si on coupe le carreau en deux.

Dans les exemples traités, on obtient de très bonnes solutions avec 2 x 2 points de Gauss. Nous remarquons également qu'avec 4 x 4 points de Gauss on a toujours une solution quasiment exacte. Les conclusions sont identiques pour la configuration des deux éléments perpendiculaires et possédant une arête commune (ligne 9 du Tableau 3.7).

Au vu de ces résultats, nous choisissons d'utiliser 4 points de Gauss pour le calcul des facteurs de vue sans contrôle de la dimension de la maille émettrice. La précision ainsi obtenue est satisfaisante pour le calcul des facteurs de vue (<0.73% pour les cas proposés ici), dans la mesure où la visibilité de la surface j est la même sur l'ensemble de la surface i : dans le cas où la maille j est entièrement visible depuis un point de Gauss et partiellement depuis un autre, le calcul est faussé. Afin de limiter cette erreur, la dimension maximale des mailles est fixée à 50 cm à l'intérieur et 1m à l'extérieur.

# 3.3.3 Seuils de perception et caractérisation de l'éblouissement

Le *DA*, le *sDA* et l'*UDI* diffèrent notamment par leur seuil de perception et le critère retenu pour la caractérisation de l'éblouissement.

La norme française NBN EN 12464-1 (2011) sur la lumière et l'éclairage des lieux de travail distingue trois zones et définit pour chacune d'elles un seuil de perception : 500 lux pour la 'zone de travail' ; 300 lux pour la 'zone environnante immédiate', une bande de 0.5 m sur le pourtour de la zone de travail ; 100 lux sur la 'zone de fond'. Le code du travail recommande un niveau d'éclairement minimal de 120 lux (article 4223-4) et impose un accès à la lumière naturelle et une vue sur l'extérieur (articles R 4213-2 et R 4323-1).

(Reinhart, 2011) s'appuient sur les normes en vigueur pour l'éclairage artificiel et considèrent un seuil de perception de 500 lux pour le DA. (Nabil, 2005) retiennent un seuil de 100 lux pour l'UDI, considérant que l'être humain tolère des niveaux d'éclairement plus bas en cas de lumière naturelle. (Paule, 2015) indiquent par ailleurs que les niveaux d'éclairement sont généralement inférieurs à 150 lux lorsque les usagers mettent en marche l'éclairage artificiel.

Un seuil de perception de 300 lux est considéré pour le *sDA* dans les critères de certification LEEDv4 (Leadership in Energy and Environmental Design, 2013). Nous retenons également ce critère, qui s'est montré le plus discriminant dans les études que nous avons réalisées.

De nombreux indicateurs permettent la caractérisation du risque d'éblouissement dû à une source de lumière artificielle ; (Petherbridge, 1950) proposent notamment le *Building Research Station (BRS)* glare equation, ces travaux sont adaptés par (Einhord, 1979) qui propose le *CIE Glare Index (CGI)* afin de permettre la prise en compte de multiples sources d'éblouissement.

Le risque d'éblouissement dû à une source de lumière naturelle est plus difficile à caractériser du fait notamment de la variabilité de la luminance et de l'étendue de la source lumineuse. (Hopkinson, 1972) puis (Chauvel, 1982) définissent le *Daylight Glare Index* (*DGI*), adaptation du *BRS* pour la caractérisation de l'éblouissement dû à une source naturelle. (Iwata, 1990) montrent cependant que ces indicateurs ne permettent pas de prédire l'éblouissement dans le cas d'une source étendue, et ne sont donc pas adaptés à une ou plusieurs fenêtres. La CIE propose le *Unified Glare Rating system* (*UGR*) en 1992, une combinaison du *CGI* et du *DGI* mais qui reste limité à des sources de lumières artificielles et peu étendues (d'angles solides <  $10^{-1}$ sr) (Wienold, 2006).

(Wienold, 2006) proposent le *Daylight Glare Probality* (*DGP*), qui prend en compte l'éclairement vertical au niveau de l'œil et la position des sources lumineuses dans le champ de vision de l'utilisateur. Cet indicateur affiche une très forte corrélation avec les niveaux d'éblouissement ressentis dans le cas

d'une source naturelle. (Motamed, 2015) montrent cependant qu'un déplacement de 30 cm ou une inclinaison de 30° du capteur engendrent un écart de plus de 30% sur le résultat obtenu. Dans le plan masse, l'incertitude est grande sur le positionnement de la zone de travail et le recours à un tel indicateur doit donc être écarté à cette étape.

(Roche, 2000) et (Roche, 2002) étudient la réaction des occupants à la lumière naturelle dans un immeuble de bureaux et indiquent que l'environnement lumineux est confortable pour des niveaux d'éclairement horizontal inférieurs à 1800 lux. En s'appuyant sur ces références, (Nabil, 2005) choisissent de caractériser l'éblouissement par un éclairement horizontal supérieur à 2000 lux et retiennent ce critère dans leur définition de l'*UDI*. Nous retenons également ce critère dont nous discutons la validité dans la suite de ce chapitre.

Nous notons  $UDI_{300}$  la part d'une année avec un niveau d'éclairement compris entre 300 et 2000 lux, et  $DA_{300}$  la part d'une année avec un niveau d'éclairement supérieur à 300 lux. Nous analysons dans la suite de ce chapitre les conditions d'éclairage naturel dans un intérieur type de bureau à l'aide de ces deux indicateurs. L'idée est ici d'identifier, pour une typologie de local donnée, un lien entre les conditions d'éclairage naturel à l'extérieur du bâtiment.

### 3.3.4 Estimation de l'illuminance intérieure à partir des luminances extérieures

Le facteur de vue différentiel, ou facteur de vue de point à surface  $F_{dS-j}$ , défini comme la fraction visible de la surface j pondérée par le cosinus de la direction considérée, traduit la fraction de l'énergie émise par la surface j reçue par l'élément différentiel dS:

$$F_{dS-j} = \frac{\int_{x \in j} \cos(\theta) \operatorname{Vis}_{x} d\omega}{\int_{x \in 2\pi} \cos(\theta) d\omega}$$
 Équation 3.39

Avec  $\theta$  [°] l'angle entre la normale au point considéré et la direction de l'élément différentiel d'angle solide  $d\omega$  et  $Vis_{\chi}$  un coefficient de visibilité (0 ou 1). Soit, d'après (Beckers, 2014a, formules 4.13 et 4.14 p. 133) :

$$F_{dS-j} = \frac{1}{\pi} \int_{x \in j} \cos(\theta) \operatorname{Vis}_{x} d\omega \qquad \text{Équation 3.40}$$

Le facteur de vue du ciel est le facteur de vue différentiel de la voûte céleste :

$$SVF = \frac{1}{\pi} \int_{x \in 2\pi} \cos(\theta) \ Vis_x \ d\omega$$
 Équation 3.41

Le flux lumineux  $E_{dS,j}$  émis par une surface j reçu par un élément différentiel dS peut être exprimée comme suit, avec  $L_{j,x}$  la luminance de la surface j dans la direction de l'élément différentiel d'angle solide  $d\omega$ :

$$E_{dS,j} = \int_{x \in j} \cos(\theta) \ Vis_x \ L_{j,x} \ d\omega \qquad \text{Équation 3.42}$$

Si l'on suppose la surface *j* de luminance constante  $L_j$ ,  $E_{dS,j}$  peut être exprimé comme une fonction de  $F_{dS-j}$  et  $L_j$ :

$$E_{dS,j} = \pi F_{dS-j} L_j$$
 Équation 3.43

De même le flux lumineux  $E_{dS,sky}$  émis par la voûte céleste et reçu par un élément différentiel dS est une fonction de la luminance de la voûte dans la direction de l'élément différentiel d'angle solide  $d\omega$ :

### 22/02/2018

$$E_{dS,sky} = \int_{x \in j} \cos(\theta) \ Vis_x \ L_{sky,x} \ d\omega \qquad \text{Équation 3.44}$$

En supposant la voûte céleste de luminance constante  $L_{skv}$  :

$$E_{dS,sky} = \pi SVF L_{sky}$$
 Équation 3.45

Soit OVF le facteur de vue des surfaces extérieures et de la voûte céleste. Il est possible d'estimer pour un OVF donné l'illuminance résultante des sources de lumière extérieures à partir de leur luminance. Si l'on néglige les réflexions internes, il est donc possible d'estimer pour un OVF donné : (1) la luminance minimale  $L_{min}$  permettant une illuminance supérieure à 300 lux ; (2) la luminance maximale  $L_{max}$  entrainant une illuminance supérieure à 2000 lux.

(Nahon, 2015) montrent l'impact des réflexions internes, et donc de détails architecturaux introduits au plan d'îlots, sur l'*UDI* et le *DA* pour un faible *OVF* (<4.5%) ; pour un *OVF* plus important, le flux lumineux résultant des sources extérieures semble prédominer. Soient (1) la "Luminance Suffisante" (SL), le pourcentage des heures d'une année de travail avec une luminance supérieure à  $L_{min}$ ; (2) la "Luminance Utile" (UL), le pourcentage des heures d'une année de travail avec une luminance comprise entre  $L_{min}$  et  $L_{max}$ ; (3) la "Luminance Excessive" (EL), le pourcentage des heures d'une année de travail avec une luminance supérieure à  $L_{max}$ . Sur base de ces trois indicateurs il est donc possible d'identifier pour un *OVF* donné les sources lumineuses extérieures les plus favorables à l'atteinte d'un  $DA_{300}$  et d'un  $UDI_{300}$  importants.

# 3.4 Evolution de l'OVF à l'intérieur d'un bureau type

Nous nous intéressons à un bâtiment de bureaux, du fait du poids important des consommations d'éclairage artificiel pour cet usage. De nombreuses géométries types sont proposées dans la littérature pour cet usage (Nabil, 2005, Robinson, 2005, Reinhart, 2011). Les partenaires du projet *SERVEAU* proposent de considérer, pour un bureau individuel, un indice d'ouverture de 25 %, une hauteur sous plafond de 3 m, une hauteur d'allège de 1.1 m, une profondeur de 6 m et une largeur de 3.5 m. Le coefficient de transmission lumineuse des vitrages dépend notamment du standard de performance retenu ; nous retenons une valeur de 75% correspondant à un double vitrage. On considère une fenêtre d'une hauteur de 1.5 m sur toute la largeur du bureau ; des coefficients de réflexion standards de 0.2 pour le plancher, 0.7 pour les murs et 0.8 pour les plafonds. On place une grille de capteurs horizontaux à 0.8 m du sol, le premier à 25 cm de la fenêtre puis espacés de 50 cm (cf. Figure 3.15), tel que proposés par (Nabil, 2005 et Reinhart, 2006).



*Figure 3.15. Description du cas d'étude – Bureau individuel.* 

On considère un milieu dégagé, l'*OVF* peut donc être assimilé au *SVF*. La voûte céleste est divisée en 500 tuiles caractérisées par un angle solide constant  $d\Omega = \frac{2\pi}{500}$ . Le *SVF* au niveau de la position des capteurs est calculé suivant :

$$SVF = \frac{1}{\pi} \sum_{x=1}^{500} \cos(\theta) \ Vis_x \ d\Omega \qquad \text{Équation 3.46}$$

La visibilité de chacune des tuiles de ciel est établie par un test en son centre ; si le centre de la tuile est visible, alors elle l'est considérée entièrement.

On obtient des valeurs comprises entre 25% à proximité de la fenêtre et 1% au fond du local. On note que le SVF diminue rapidement de 25% au bord de la fenêtre à 2.5% à 3.25m de profondeur, puis plus lentement jusqu'à une valeur de 1% au fond du local, avec un comportement plus erratique au fond du local dû à la discrétisation de la voûte céleste.



*Figure 3.16. Evolution du facteur de vue du ciel, à hauteur du plan de travail et le long de la rangée centrale* 

Les locaux tertiaires sont de façon générale découpés en deux bandes de luminaires et, dans la perspective d'études de potentielles économies d'énergie sur l'éclairage artificiel, on considère séparément deux zones parallèles à la façade extérieure. Le label LEEDv4 distingue par exemple dans sa notation les niveaux d'éclairement obtenus sur 50 et 75% du local. La certification *Haute Qualité Environnementale* (HQE) définit une *'zone de premier rang'*, délimitée en profondeur à une distance égale à deux fois la hauteur entre le plan de travail et le plafond ; soit près de 75% du local étudié. La certification sera accordée si les conditions d'éclairage naturel sont jugées satisfaisantes sur 80% de la zone de premier rang, soit sur près de 50% du local étudié.

Nous proposons de distinguer deux zones pour l'étude des conditions d'éclairage naturel dans un intérieur (cf. Figure 3.17) :

- la *zone de premier rang*, s'étendant sur 50% de la surface du local et caractérisée par un *SVF* minimal de 4.5% ;
- la zone de second rang, s'étendant sur 75% de la surface du local, caractérisée par un SVF minimal de 1.5%.

Nous analysons dans les paragraphes suivants les plages de luminances permettant un éclairement utile sur chacune de ces zones.



Figure 3.17. Distribution du facteur de vue du ciel à l'intérieur du local

# 3.5 Identification des luminances utiles extérieures

### 3.5.1 Distribution de la lumière sur la voûte céleste

La distribution de la lumière sur la voûte céleste dépend de la position du Soleil et du couvert nuageux. Nous proposons d'analyser ce dernier en comparant le rayonnement direct mesuré avec celui théorique par temps clair, obtenu suivant le modèle de (Liu, 1960) décrit ci-après, en considérant une transmittance atmosphérique constante de 0.7. La Figure 3.18 présente son évolution au cours d'une année à Paris.



Figure 3.18. Part du rayonnement direct non intercepté par les nuages (moyennes mensuelles) – Paris.

En moyenne 70% du rayonnement direct est intercepté à Paris au cours d'une année, avec un maximum de 82% au mois de mars et un minimum de 56% en aout. On peut donc estimer que le Soleil est voilé en moyenne 70% de l'année. Ce résultat pointe l'importance de la prise en compte du rayonnement diffus dans le dessin architectural ; l'accès au rayonnement direct est limité au cours d'une année et le rayonnement diffus apparaît déterminant pour l'accès à la lumière naturelle.

(Liu, 1960) proposent un modèle permettant d'estimer en l'absence de nuages l'irradiance directe sur un plan faisant face aux rayons du Soleil  $Ib_{n,clair}$  [W/m<sup>2</sup>] (Équation 3.47) et diffuse sur un plan horizontal  $Id_{h,clair}$  [W/m<sup>2</sup>] (Équation 3.48) :

$$Ib_{n,clair} = \tau^m G_{on} ps$$
 Équation 3.47

$$Id_{h,clair} = 0.3 (1 - \tau^m) G_{on} \cos(\theta_z)$$
 Équation 3.48

Avec :

- $\tau$ : la transmittance atmosphérique, grandeur sans dimension qui caractérise l'affaiblissement du rayonnement solaire par l'atmosphère ;
- *m* : masse optique de l'air (cf. § 3.2.3, Équation 3.7) ;
- Gon : rayonnement solaire extra-atmosphérique (W/m<sup>2</sup>) (cf. § 3.2.3, Équation 3.8) ;
- $\theta_z$  : l'angle zénithale du Soleil ;
- *ps* : le produit scalaire de la normale au point considéré et de la direction du Soleil.

La Figure 3.19 illustre les écarts entre les irradiances directe et diffuse théoriques et mesurées [kW/m<sup>2</sup>] en fonction du couvert nuageux au cours d'une journée. En rouge, les irradiances par temps clair [W/m<sup>2</sup>], en magenta les irradiances observées [W/m<sup>2</sup>] ; en trait plein les irradiances directes, en pointillé les irradiances diffuses.



*Figure 3.19. Ecarts entre les irradiances théoriques en l'absence de nuages et mesurées pour un ciel (de gauche à droite) dégagé, couvert clair, couvert sombre – Paris (48.73°N), les 17, 1<sup>er</sup> et 26 juin* 

On constate un écart maximal de l'ordre de 100 W/m<sup>2</sup> pour le direct et 50 W/m<sup>2</sup> pour le diffus entre les irradiances théoriques et mesurées pour un ciel dégagé. Il est possible de limiter cet écart en tenant compte de la variabilité de la transmittance de l'atmosphère. La précision ainsi obtenue est toutefois satisfaisante pour illustrer l'impact du couvert nuageux sur la puissance du rayonnement diffus par temps couvert. Pour un ciel entièrement couvert de nuages clairs, le rayonnement diffus est près de quatre fois supérieure à celui théorique par temps clair, avec un écart maximal supérieur à 300 W/m<sup>2</sup>. Pour un couvert nuageux plus épais l'écart est moins important, avec une irradiance diffuse mesurée deux fois supérieure à celle par temps clair et un écart maximal supérieur à 100 W/m<sup>2</sup>. La voûte céleste est donc globalement plus lumineuse en présence de nuages.

La Figure 3.20 illustre les variations de la répartition de la lumière sur la voûte céleste pour trois types de ciel décrits ci-avant. La voûte céleste est divisée en 500 tuiles tel que décrit dans le § 3.2.1, la

luminance de chacune d'elle est estimée à partir du modèle de (Perez, 1993) tel que décrit dans le § 3.2.3.



Figure 3.20. Répartition de la lumière diffuse [lux/sr] sur la voûte céleste pour un ciel (de gauche à droite) dégagé, couvert clair, couvert épais – Paris (48.73°N), les 17, 1<sup>er</sup> et 26 juin à 13h.

Par temps clair, l'essentiel de la lumière est concentré aux alentours du soleil, le reste de la voûte est caractérisé par de faibles luminances à l'exception d'une bande plus lumineuse à l'horizon. Par temps couvert, la lumière est plus uniformément répartie sur la voûte céleste, avec un gradient fonction de la hauteur zénithale. On note des écarts très important en fonction de l'épaisseur du couvert nuageux.

Lorsqu'il est visible, le rayonnement direct est systématiquement source d'éblouissement. C'est donc l'accès à la lumière diffuse qui est déterminant au regard des conditions d'éclairage naturel. Afin d'illustrer la disparité de sa répartition sur la voûte céleste au cours d'une année, nous estimons la luminance diffuse moyenne des différentes tuiles de ciel à Paris, représentée Figure 3.32. L'analyse de cette distribution permet d'identifier les directions qui émettent le plus de lumière au cours d'une année. On note par exemple pour la ville de Paris une luminance moyenne deux fois supérieure sur la moitié Sud que sur la moitié Nord de l'hémisphère, le long des trajets solaires, représentés aux solstices et aux équinoxes par des traits blancs.



Figure 3.21. Luminance diffuse moyenne sur les heures de jour de la voûte céleste à Paris

Cette analyse ne permet cependant pas d'identifier les directions de la voûte céleste les plus favorables à l'éclairage naturel ; il y a ici un effet de seuil, des luminances très importantes peuvent entrainer un risque d'éblouissement et, inversement, des luminances relativement faibles peuvent s'avérer suffisantes.

La Figure 3.22 représente la distribution de la des luminances suffisante (SL), utile (UL) et excessive (EL) définies § 3.3.4 pour des facteurs de vue de l'extérieur de 13, 4.5 et 2.5%, correspondants au facteur de vue moyen et minimax des zone de premier et second rang du local type défini au § 3.4.



Figure 3.22. Pourcentage annuel des heures occupées avec une luminance suffisante (en haut) ; excessive (au centre) et utile (en bas)

	(UL)
moyennes des moitiés Sud et Nord de l'hémisphère.	

	1 <sup>er</sup> rang ( <i>SVF</i> =13%)		mi profondeu	r ( <i>SVF</i> =4.5%)	2 <sup>nd</sup> rang (SVF =2.5%)		
	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	
SL	89%	89%	76 % (de 69 à 76 %)	70 % (de 63 à 76 %)	56 % (de 43 à 64 %)	43 % (de 33 à 56 %)	
EL	44 % (de 32 à 52 %)	27 % (de 17 à 40 %)	9 % (de 2 à 14 %)	0%	2%	0%	
UL	45 % (de 37 à 52 %)	61 % (de 48 à 72 %)	67%	69%	54%	43%	

Tableau 3.8. Comparaison des SL, EL et UL moyens des moitiés Sud et Nord de la voûte céleste

L'analyse de la distribution de la SL sur la voûte céleste permet d'identifier les directions à favoriser pour maximiser le  $DA_{300}$  à l'intérieur du local. Au vu de ce tableau, nous émettons l'hypothèse que, pour le local type considéré et dans un contexte dégagé, (1) le  $DA_{300}$  moyen est de 90% sur la zone de premier rang quelle que soit l'orientation du local ; (2) de 76% au fond de la zone de premier rang pour une orientation Sud contre 70% pour une orientation Nord ; (3) de 56% sur la zone de second rang pour nue orientation Sud contre 43% au Nord. Une orientation Sud semblent donc à privilégier pour maximiser le  $DA_{300}$  à l'intérieur du local. On note toutefois que l'écart moyen est nul sur la zone de premier rang, avec une différence inférieure à 6% à mi profondeur, soit une différence nettement moins importante que ne le laissait supposer l'analyse de la Figure 3.20. Ce résultat ne tient de plus pas compte du risque d'éblouissement et de son possible impact sur le  $DA_{300}$  au travers d'éventuelles protections solaires.

L'analyse de la distribution de la EL permet de caractériser le risque d'éblouissement dans les différentes directions de la voûte céleste. Au vu du Tableau 3.8, nous émettons les hypothèses suivantes : (1) Le risque d'éblouissement sur la zone de premier rang est de 44% pour une orientation Sud contre 27% pour une orientation Nord ; (2) à mi profondeur, au fond de la zone de premier rang, le risque d'éblouissement est de 9% pour une orientation Sud et nul pour une orientation Nord ; (3) sur la zone de second rang, le risque d'éblouissement moyen est nul quelle que soit l'orientation.

La UL constitue une synthèse des résultats précédents et permet d'identifier les directions de la voûte céleste permettant de maximiser l'autonomie en éclairage naturel tout en limitant le risque d'éblouissement. On déduit des résultats présentés dans le Tableau 3.8 une estimation de l' $UDI_{300}$  moyen : (1) de 45% sur la zone de premier rang pour une orientation Sud, contre 61% pour une orientation Nord ; (2) de 67% à mi profondeur pour une orientation Sud contre 69% pour une orientation Nord ; (3) de 54% sur la zone de second rang pour une orientation Sud contre 43% pour une orientation Nord. Afin de valider ces hypothèses, nous proposons dans le paragraphe suivant une analyse des conditions d'éclairage naturel à l'intérieur du local type de bureau individuel décrit Figure 3.15.

# 3.5.2 Validation en milieu dégagé

La Figure 3.23 représente l'évolution de l' $UDI_{300}$  à l'intérieur d'un local type de bureau en considérant une orientation Nord (en haut de la figure) et Sud (en bas de la figure). La courbe à droite de la figure représente l'évolution de la part des heures d'une année de travail un avec un éclairement de 300 et 2 000 lux en fonction de la profondeur sur la rangée centrale. L'illuminance au niveau du plan de travail est calculée suivant la méthode de la radiosité telle que décrite au 3.2.6. La voûte céleste est divisée en 500 tuiles et le pas de temps fixé à 15 minutes.

Nous comparons dans le Tableau 3.9 les valeurs calculées et estimées à partir de la luminance de la voûte céleste de l' $UDI_{300}$ , du  $DA_{300}$  et du risque d'éblouissement (noté EL) moyens sur les zones de premier et second rang et à mi profondeur. Les écarts supérieurs à 10% sont signalés en rouge.

		1 <sup>er</sup> rang (S	SVF=13%)	mi prof. ( <i>SVF</i> =4.5%)		2 <sup>nd</sup> rang (S	VF =2.5%)
		Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord
()	modélisée	90	89	80	78	79	73
A (%	prévue	89	89	76	70	56	43
	Δ	1	0	4	8	23	30
	modélisée	62	34	34	0	15	0
) T	prévue	44	27	9	0	2	0
ш	Δ	18	7	25	0	13	0
(9	modélisée	29	55	46	78	64	73
DI (9	prévue	45	61	67	69	54	43
Ū	Δ	-16	-6	-21	9	10	30

Tableau 3.9. Valeurs calculées et estimées de l'UDI<sub>300</sub>, du DA<sub>300</sub> et du risque d'éblouissement moyens

Les hypothèses émises sur le  $DA_{300}$  sont validées sur la zone de premier rang, avec une différence moyenne inférieure à un point et une différence maximale de 8 points à mi profondeur pour une

orientation Nord. L'écart entre les valeurs prévues et modélisées atteint 30% sur la zone de second rang où le poids des réflexions internes est plus important.

Le risque d'éblouissement est de façon générale sous-estimée, avec un écart atteignant 25 points à mi profondeur pour une orientation Sud. L' $UDI_{300}$  est donc surestimée sur la zone de premier rang, avec un écart de 21 points à mi profondeur pour une orientation Sud. Ce phénomène s'explique par le fait qu'un nombre très limité de tuiles de ciel peut être responsable du risque d'éblouissement sur un pas de temps donné, quand toutes les autres tuiles ont une luminance inférieur à  $L_{max}$  que la EL moyenne est donc faible.



Figure 3.23. UDI<sub>300-2000</sub> pour une fenêtre au Nord (en haut) et au Sud (en bas)

### 3.5.3 Prise en compte de l'environnement urbain

Dans un contexte urbain, la voûte céleste est en partie masquée par les bâtiments environnants et le sol, qui sont le siège de réflexions lumineuses. Les conditions d'éclairage naturel à hauteur du plan de travail dépendent donc non seulement du SVF et de la luminance de la voûte céleste, mais également du facteur de vue FF et de la luminance des surfaces extérieures. Afin d'identifier l'orientation optimale d'une façade du point de vue de l'accès à l'éclairage naturel, il convient d'étudier la répartition de la lumière sur ces objets au cours d'une année.

La luminance  $Lv_{fac}$  [lux/sr] d'une paroi extérieure dépend de son éclairement  $E_{fac}$  [lux] et de son coefficient de réflexion  $\rho$ . On l'obtient suivant l'Équation 3.49.

$$Lv_{fac} = \frac{\rho E_{fac}}{\pi}$$
 Équation 3.49

Le flux lumineux  $E_{dS,fac}$  [lux] émis par la paroi extérieure reçue fac par un élément de surface différentiel dS est obtenu suivant l'Équation 3.50 ; avec ftl le facteur de transmission lumineuse du vitrage, FF le facteur de vue de la paroi extérieure et  $Lv_{fac}$  sa luminance [lux/sr].

$$E_{dS,fac} = \pi F_{dS,fac} L_{fac} ftl$$
 Équation 3.50

De même que pour la voûte céleste, il est possible de déterminer la plage de luminances utiles des surfaces extérieures pour un facteur de vue donné à partir de cette équation.

La Figure 3.25 représente la luminance moyenne des façades Sud et Nord d'une rue typique d'un quartier haussmannien. On note que ces valeurs sont sensiblement inférieures à la luminance diffuse moyenne de la voute céleste, pour une orientation Sud comme pour une orientation Nord, avec une luminance moyenne maximale de l'ordre de 3500 lux/sr contre plus de 8000 lux/sr le long des trajets solaires. Pour cette configuration de rue, les réflexions sur les façades extérieures ne peuvent donc pas *a priori* compenser la perte de lumière engendrée par l'obstruction associée.

La rue est d'une largeur de 10 m et les bâtiments de part et d'autres ont une hauteur de 19 m, correspondant à un R+5 avec un commerce en rez-de-chaussée d'une hauteur de 4 m et des bureaux d'une hauteur de 3 m dans le reste des étages (cf. Figure 3.24). Le coefficient de réflexion de la chaussée est fixée à 0.2, celui des façades extérieur de 0.5.



Figure 3.24. Profil de la rue étudiée (haut gauche) ; photographie au sol (bas gauche) et aérienne (droite) d'un quartier haussmannien (source : <u>https://earth.google.com/</u>)



Figure 3.25. Luminance moyenne sur une année de travail des façades orientées Sud (gauche) et Nord (droite) d'une rue haussmannienne – Paris (48.73°N).

La Figure 3.26 représente la part d'une année avec une luminance utile des façades orientées au Nord et au Sud pour les facteurs de vue de l'extérieur (*OVF*) moyens des zones de premier et second rang et à mi profondeur du local décrit au § 3.4.



Figure 3.26. Part d'une année de travail avec une luminance 'utile' pour un facteur de vue de l'extérieur 15, 10, 5 et 3 % (gauche à droite) pour une façade orientée Sud (haut) et Nord (bas)

	1 <sup>er</sup> rang (SVF=13%)		mi profondeu	r ( <i>SVF</i> =4.5%)	2 <sup>nd</sup> rang ( <i>SVF</i> =2.5%)	
	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord
SL	67 % (de 56 à 76 %)	61 % (de 50 à 71 %)	32 % (de 16 à 48%)	0% (de 0 à 8%)	15 % (de 5 à 28%)	0%
EL	9 % (de 2 à 18 %)	0 %	0 %	0%	0%	0%
UL	58 % (de 54 à 60 %)	61 % (de 50 à 71 %)	32 % (de 16 à 48%)	0% (de 0 à 8%)	15 % (de 5 à 28%)	0%

Le Tableau 3.10 présente une comparaison des luminances suffisantes (SL), excessives (EL) et utiles (UL) moyennes des façades orientées Sud et Nord.

Tableau 3.10. Comparaison des SL, EL et UL moyens des façades orientées Sud et Nord

Ces résultats montrent que la lumière réfléchie par la façade orientée Sud : (1) entraine un risque d'éblouissement en moyenne 9% de l'année sur la zone de premier rang, contre 0% pour la façade orientée Nord ; (2) permet un éclairement suffisant 67% de l'année et utile 58% en moyenne sur la zone de premier rang, contre 61% pour une façade orientée Nord ; (3) permet un éclairement utile 32% de l'année à mi profondeur et 15% de l'année sur la zone de second rang, contre 0% pour une façade orientée Nord.

Une partie de la voûte céleste est également visible depuis les fenêtres des locaux donnant sur la paroi extérieure ; nous proposons d'estimer le  $DA_{300}$  et l' $UDI_{300}$  à partir des luminances suffisantes (SL), excessives (EL) et utiles (UL) moyennes des surfaces extérieures et de la voûte céleste visibles depuis les fenêtres, présentées dans le Tableau 3.11 pour le local type décrit précédemment placé au R+1 de la rue décrite ci-dessus.

	1 <sup>er</sup> rang ( <i>SVF</i> =13%)		mi profondeu	r ( <i>SVF</i> =4.5%)	2 <sup>nd</sup> rang ( <i>SVF</i> =2.5%)	
	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord
SL	67 %	76 %	50 %	52 %	35 %	30 %
EL	28 %	20 %	6 %	1 %	1 %	0 %
UL	37 %	56 %	44 %	51 %	33 %	30 %

Tableau 3.11. SL, EL et UL moyens des surfaces extérieures et de la voûte céleste visibles depuis lecentre de la fenêtre du local placé en R+1

### 3.5.4 Validation dans un contexte urbain

La Figure 3.27 représente l'évolution de l' $UDI_{300}$  à l'intérieur du local type de bureau décrit précédemment, placé à tous les étages du R+1 au R+5 de la rue décrite ci-dessus. Le Tableau 3.12 propose une comparaison des valeurs calculées et estimées à partir des SL, UL et EL de la voûte céleste et des surfaces extérieures de l' $UDI_{300}$ , du  $DA_{300}$  et du risque d'éblouissement (noté EL) moyens sur les zones de premier et second rang et à mi profondeur. Les écarts supérieurs à 10% sont signalés en rouge.



Figure 3.27. *UDI*<sub>300 –2000</sub> pour une façade orientée Sud (gauche) et Nord (droite)

		1 <sup>er</sup> rang (SVF=13%)		mi prof. ( <i>SVF</i> =4.5%)		2 <sup>nd</sup> rang ( <i>SVF</i> =2.5%)	
		Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord
()	modélisée	87	86	77	76	73	71
A (%	prévue	67	76	50	52	35	30
D	Δ	20	10	27	24	38	41
EL (%)	modélisée	44	37	7	0	2	0
	prévue	28	20	6	1	1	0
	Δ	16	17	1	-1	1	0
UDI (%)	modélisée	42	51	70	76	71	71
	prévue	37	56	44	51	33	30
	Δ	5	-5	26	25	38	41

Tableau 3.12. Valeurs calculées et estimées de l'UDI<sub>300</sub>, du DA<sub>300</sub> et du risque d'éblouissement moyens au R+1

Les estimations du  $DA_{300}$  moyen sur la zone de premier rang ne sont pas satisfaisantes, avec un écart de 20 et 10 points respectivement pour un local orienté au Sud et au Nord, de plus 25 points à mi profondeur. Le risque d'éblouissement est une nouvelle fois sous-estimé, avec des écarts respectifs de 16 et 17 points. Les estimations de l' $UDI_{300}$  apparaissent satisfaisantes sur la zone de premier rang mais résultent de la double sous-estimation du  $DA_{300}$  et du risque d'éblouissement.

Ce résultat montre que, si dans un contexte dégagé la lumière extérieure est prédominante à mi profondeur, le poids des réflexions internes est plus important dans le cas d'une vision partielle de la voûte céleste. L'impact des sources lumineuses de fortes luminances visibles à proximité de la fenêtre apparaît donc sous-estimé à partir de la méthode proposée. Nous analysons dans le paragraphe suivant le poids des réflexions internes sur les différentes zones caractéristiques du local et l'impact des revêtements intérieurs sur ce-dernier.

# 3.6 Analyse de l'impact des réflexions intérieures

Les conditions d'éclairage naturel à l'intérieur du local dépendent d'une part de la quantité de lumière reçue de l'extérieur et d'autre part des réflexions intérieures. Nous étudions le poids de ces dernières dans des contextes dégagé et urbain. On note  $X_{ref}$  la part d'une année de travail pour laquelle les réflexions intérieures permettent d'atteindre le seuil de 300 lux. Les valeurs de  $X_{ref}$  dans un contexte dégagé et au premier étage de la rue décrite précédemment sont renseignées respectivement dans les tableaux Tableau 3.14 et Tableau 3.15. On considère des revêtements intérieurs standards, sombres et clairs, tels que définis dans la norme française NBN EN 12464-1 sur la lumière et l'éclairage des lieux de travail (cf. Tableau 3.13).

	Plafond	Murs	Sol
Sombre	0.7	0.5	0.2
Standard	0.8	0.7	0.2
Clair	0.9	0.8	0.4

Tableau 3.13. Coefficients de réflexions intérieurs des parois, norme NBN EN 12464-1

	1 <sup>er</sup> rang (SVF=13%)		mi prof. ( <i>SVF</i> =4.5%)		2 <sup>nd</sup> rang (SVF =2.5%)	
	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord
Sombre	1 %	2 %	4 %	5 %	14 %	29 %
Standard	2 %	2 %	5 %	7 %	18 %	37 %
Clair	2 %	3 %	8 %	11 %	23 %	45 %

Tableau 3.14. Part d'une année pour laquelle les réflexions intérieures permettent d'atteindre 300 lux – dans un contexte dégagé

Dans un contexte dégagé, les réflexions internes permettent d'atteindre un éclairement de 300 lux (1) entre 1 et 3% de l'année en moyenne sur la zone de premier rang ; (2) de 4 à 11% à mi profondeur ; (3) de 14 à 45% sur la zone de second rang.

	1 <sup>er</sup> rang ( <i>SVF</i> =13%)		mi prof. (S	VF =4.5%)	2 <sup>nd</sup> rang (SVF =2.5%)	
	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord
Sombre	16 %	13 %	69 %	50 %	59 %	57 %
Standard	18 %	15 %	77 %	57 %	70 %	68 %
Clair	20 %	18 %	82 %	63 %	78 %	77 %

Tableau 3.15. Part d'une année pour laquelle les réflexions intérieures permettent d'atteindre 300 lux– au premier étage d'une rue haussmannienne

Au premier étage de la rue décrite dans les paragraphes précédents, les réflexions intérieures permettent d'atteindre un éclairement supérieur à 300 lux (1) jusqu'à 20% en moyenne sur la zone de premier rang pour des revêtements clairs ; (2) de 50 à plus de 80% de l'année à mi profondeur et sur la zone de second rang.

A mi profondeur la voûte céleste n'est pas visible depuis l'intérieur du local et la seule source de lumière extérieure est la façade opposée de la rue. La façade orientée Nord a une luminance suffisante de 0% (cf. Tableau 3.10) et ne permet effectivement jamais seule d'atteindre un éclairement de 300 lux ; l'autonomie en éclairage naturel est entièrement due aux réflexions intérieures pour une orientation Sud du local ( $X_{ref} = DA_{300}$ , cf. Tableau 3.12). Les réflexions lumineuses de la façade Sud, de luminance suffisante de 32 % (cf. Tableau 3.10), entrainent un éclairement supérieur à 300 lux près

de 20% de l'année et les réflexions intérieures permettent d'atteindre ce seuil permettent de dépasser ce seuil de 50 à 63% de l'année.

Ces résultats montrent (1) d'une part l'impact des revêtements intérieurs sur l'éclairage naturel, avec des variations du  $DA_{300}$  de respectivement 5 et 20 points sur les zone de premier et second rang en fonction du type de revêtement ; (2) d'autre part l'importance de la contribution des réflexions intérieures au  $DA_{300}$ , qui permettent d'atteindre un éclairement de 300 lux de 13 à 20% de l'année sur la zone de premier rang au premier étage d'une rue haussmannienne, de 50 à plus de 80% de l'année à mi profondeur et sur la zone de second rang.

Ces résultats montrent par ailleurs qu'il est difficile d'estimer le  $DA_{300}$ , et donc les économies potentielles sur l'éclairage artificiel, avant la définition du cloisonnement, l'ameublement et le type de revêtements intérieurs. L'indicateur de luminance suffisante d'une source lumineuse permet cependant d'estimer le  $DA_{300}$  résultant de la lumière émise par cette dernière ; il permet d'estimer le  $DA_{300}$  résultant des sources lumineuses extérieures et donc de définir les directions à privilégier pour favoriser l'accès à la lumière naturelle.

# 3.7 Discussion sur la caractérisation du risque d'éblouissement et analyse de l'impact des protections solaires

L'éblouissement d'inconfort est causé par la présence dans le champ de vision de l'observateur de sources lumineuses de luminances très différentes. Depuis l'intérieur d'un local, le ciel et les surfaces extérieures ont une luminance supérieure à celles des cloisons intérieures. Plus l'ouverture sur l'extérieur est grande, plus l'environnement lumineux est dominé par des luminances importantes. On peut donc supposer que le seuil maximal d'éclairement croit avec le facteur de vue de l'extérieur.

La Figure 3.28 représente la part d'une année de travail pour laquelle un éclairement supérieur à 2000 lux est obtenu sur le plan de travail à l'intérieur du local décrit précédemment, dans un contexte dégagé, à Paris, pour une orientation Sud et Nord. Les valeurs sont obtenues le long de la rangée centrale de capteurs (cf. Figure 3.15), pour un *SVF* de 1% au fond du local à près de 25% à 0.25 cm de la fenêtre.



Figure 3.28. Part d'une année avec un éclairement supérieur à 2000 lux en fonction du SVF — dans un contexte dégagé, à Paris
Pour une orientation Nord, l'éclairement est supérieur à 2000 lux moins de 3% de l'année pour des SVF inférieurs à 7.5%. Cette part est supérieure pour des SVF plus importants ; elle est de 27% de l'année pour un SVF de 11%, supérieure à 50% pour un SVF de plus de 16.5%. Pour une orientation Sud, l'éclairement est supérieur à 2000 lux 50% de l'année pour un SVF de 7.5% ; près de 80% de l'année pour un SVF de 25%.

Pour la ville de Paris, le risque d'éblouissement apparaît négligeable à 1.75 m de la fenêtre (facteur de vue de 11%) pour une orientation Nord dans un contexte dégagé. Le seuil d'éblouissement de 2000 lux semble donc valide pour un facteur de vue de l'extérieur de l'ordre de 7.5%, mais sous-estimé pour des facteurs de vue plus importants.

La Figure 3.29 illustre l'impact d'une protection solaire mobile sur l'éclairage naturel à l'intérieur du local. La protection solaire est modélisée comme un filtre bloquant l'intégralité du rayonnement direct et 80% du rayonnement diffus, correspondant à un store vénitien type, tel que proposé par (Nabil, 2005). Aucune protection n'est prise en compte dans le scénario de référence *(ref)*. La position (ouverte ou fermée) des protections solaires est asservie aux niveaux d'éclairement enregistrés par le capteur situé à 2.25 m de la façade, pour un *SVF* de 7.5%. (Paule, 2015) étudient le nombre de mouvements des protections solaires mobiles pour un immeuble de bureaux situé à l'EPFL Innovation Park, près de Lausanne, Suisse ; ils enregistrent en moyenne un mouvement tous les 4 jours pour des façades orientées Sud, Est et Ouest. (Reinhart, 2011) considèrent deux types d'utilisateurs *passif* et *actif*: le premier garde la protection solaire en position basse toute l'année, le second l'ouvre tous les matins et la ferme au premier éblouissement. Nous retenons deux types d'usager *passif* (1) et *actif* (2) : en cas d'éblouissement, le premier ferme la protection solaire et la maintient fermée durant quatre jours, le second uniquement durant la journée en cours.



Figure 3.29. Part d'une année avec un éclairement supérieur à 300 lux – pour une orientation Nord (gauche) et Sud (droite), avec prise en compte d'une protection solaire bloquant l'intégralité du direct et 80% du diffus pour un utilisateur passif (1) et actif (2)

Pour une orientation Nord, la protection solaire proposée entraine une réduction du  $DA_{300}$  (1) de 8% en moyenne sur la zone de second rang et de 30 % au fond du local pour un utilisateur passif ; (2) de 2% en moyenne sur la zone de second rang et de près de 10% au fond du local pour un utilisateur actif. Pour une orientation Sud, l'usage de la protection solaire proposée entraine (1) une réduction moyenne du  $DA_{300}$  de 20% sur la zone de premier rang, de 61% sur la zone de second rang et de près de 80% au fond du local pour un utilisateur passif; (2) une réduction moyenne du  $DA_{300}$  de 7% sur la zone de premier rang, de 44% en moyenne sur la zone de second rang et de près de 60% au fond du

local pour un utilisateur actif. Ces résultats sont récapitulés dans le Tableau 3.16. Le store est respectivement en position basse 10 et 30% de l'année pour une orientation Nord ; 65 et 96% de l'année pour une orientation Sud.

	1 <sup>er</sup> rang (S	SVF=13%)	mi prof. (S	VF =4.5%)	2 <sup>nd</sup> rang (SVF =2.5%)		
	Sud Nord		Sud	Nord	Sud	Nord	
passif	20 %	8 %	40 %	28 %	61 %	30 %	
actif	7 %	2 %	20 %	7.5 %	44 %	9 %	

Tableau 3.16. Réduction du  $DA_{300}$  causée par une protection solaire bloquant 80% du diffus

Les hypothèses retenues pour la modélisation des protections solaires ont un fort impact sur le  $DA_{300}$ à l'intérieur du local. La Figure 3.30 reprend les résultats présentés ci-dessus pour une protection solaire bloquant l'intégralité du rayonnement direct et 50% du rayonnement diffus.



Figure 3.30 Part d'une année avec un éclairement supérieur à 300 lux – pour une orientation Nord (gauche) et Sud (droite), avec prise en compte d'une protection solaire bloquant l'intégralité du direct et 50% du diffus pour un utilisateur passif (1) et actif (2)

Pour une orientation Nord, l'impact de la protection solaire considérée est négligeable sur les zones de premier et second rang pour les deux types d'utilisateur considéré. Elle entraine une réduction du  $DA_{300}$  (1) de 7% en moyenne sur la zone de second rang et de près de 25% au fond du local pour un utilisateur passif ; (2) de 1% en moyenne sur la zone de second rang et de près de 5% au fond du local pour un utilisateur actif. Pour une orientation Sud, l'usage de la protection solaire proposée entraine (1) une réduction moyenne du  $DA_{300}$  de 5% sur la zone de premier rang, de 16% sur la zone de second rang et de 25% au fond du local pour un utilisateur passif; (2) une réduction moyenne du  $DA_{300}$  de 1% sur la zone de premier rang, de 16% sur la zone de second rang et de 25% au fond du local pour un utilisateur passif; (2) une réduction moyenne du  $DA_{300}$  de 1% sur la zone de second rang et de 12% au fond du local pour un utilisateur actif. Ces résultats sont récapitulés dans le Tableau 3.17.

	1 <sup>er</sup> rang (S	SVF=13%)	mi prof. (S	VF =4.5%)	2 <sup>nd</sup> rang (SVF =2.5%)		
	Sud	Nord	Sud	Nord	Sud	Nord	
passif	5 %	-	9 %	-	16 %	7 %	
actif	1 %	-	2 %	-	6 %	1 %	

Tableau 3.17. Réduction du DA<sub>300</sub> causée par une protection solaire bloquant 50% du diffus

L'usage de protections solaires entraine pour les cas étudiés une réduction du  $DA_{300}$  de 0 à 20 % de l'année en moyenne sur la zone de premier rang ; de 0 à 40% à mi profondeur ; de 1 à 61% en moyenne sur la zone de second rang. Le type et la stratégie de contrôle des protections solaires mobiles ont donc un fort impact sur l'accès à la lumière naturelle et ces résultats montrent une nouvelle fois la difficulté d'estimer le  $DA_{300}$  avant leur définition.

## 3.8 Comparaison de la luminance utile de la voûte céleste dans différentes villes du monde

La Figure 3.31 représente l'évolution du couvert nuageux dans les villes de Quito (0.15°S, Equateur), Montréal (45.47°N) et Paris (48.73°N). Le couvert nuageux est très important tout au long de l'année à Paris et Quito, avec en moyenne respectivement 70 et 73% du rayonnement solaire intercepté par les nuages, un maximum de 82 et 85% en février et en avril, un minimum de 56 et 54% en août. L'ensoleillement est nettement plus important à Montréal, avec 32% du rayonnement solaire intercepté en moyenne au cours d'une année, un minimum de 13% en février et un maximum de 42% en avril.



Figure 3.31. Part du rayonnement intercepté par les nuages au cours d'une année (moyennes mensuelles) – Quito (Equateur), Paris et Montréal

L'évolution du couvert nuageux est similaire à Paris et à Quito ; les trajets solaires sont par ailleurs comparables à Paris et Montréal, séparées par 3° de latitude. La distribution de la lumière sur la voûte céleste au cours d'une année dépend principalement de ces deux paramètres ; elle est donc très différente pour ces trois villes. La Figure 3.32 représente la luminance moyenne des tuiles de ciel au cours d'une année à Quito, Montréal et Paris et illustre cette disparité. On remarque en premier lieu que les luminances sont en moyennes nettement supérieures à Quito, avec un maximum de 10 240 lux/sr le long des trajets solaires contre 8 030 lux/sr à Paris. Quito étant situé sur l'équateur, la distribution de la lumière sur la voûte céleste est parfaitement symétrique. Si l'on compare les villes de Paris et Montréal, on remarque que la moitié Nord de l'hémisphère reçoit en moyenne moins de lumière au cours de l'année au niveau de cette-dernière, avec une différence de l'ordre de 500 lux/sr. Bien que le Soleil passe légèrement plus près du zénith à Montréal, et donc de la moitié Nord de l'hémisphère, l'essentiel de la lumière est concentré sur la moitié Sud de l'hémisphère, le long des trajets solaires couvert nuageux.

22/02/2018



Figure 3.32. Luminance diffuse moyenne de jour de la voûte céleste à Quito (gauche), Montréal (centre) et Paris (droite).

La Figure 3.33 illustre la variabilité de la distribution sur la voûte céleste pour ces trois villes des SL, UL et EL. On considère un *SVF* de 4.5%, correspondant au facteur de vue de l'extérieure minimal sur la zone de premier rang. La voûte céleste est projetée sur le plan horizontal suivant la projection équivalente proposée par (Lambert, 1970), telle que décrite par (Beckers, 2014a, p.104), qui permet de conserver les surfaces des tuiles de ciel.



Figure 3.33. Luminances Suffisantes (SL), Utiles (UL) et Excessives (EL) de la voûte céleste pour les villes de Quito, Montréal et Paris (SVF = 4.5%)

A Quito comme à Paris, l'importance du couvert nuageux entraine une répartition de la lumière relativement uniforme sur l'ensemble de la voûte céleste. L'absence de nuages à Montréal entraine des différences plus marquées.

A Paris, la voûte céleste a, pour un *SVF* de 4.5%, une SL de près de 70% à l'horizon et le long des trajets solaires, avec une zone plus sombre (et une SL minimum de 48%) au Nord pour des angles zénithaux importants. A Montréal les différences sont plus marquées, avec une SL atteignant 84% à l'horizon et tombant jusqu'à 42% sur la moitié Nord de l'hémisphère. A Quito, la SL est supérieure à 72% sur l'ensemble de la voûte céleste avec une différence de 15% entre le zénith et l'horizon. Il est intéressant de noter que pour ces trois villes la SL est globalement plus faible le long des trajets solaires qu'à l'horizon, qui a pourtant une luminance moyenne moins importante.

Le risque maximal d'éblouissement le long des trajets solaires est de 9% à Montréal, de 12% à Paris et de 14% à Quito. On remarque que la zone de la voûte céleste entrainant un risque d'éblouissement est plus étendue à Paris qu'à Montréal.

A Paris, la SL est légèrement plus importante sur la moitié Sud de l'hémisphère. Cette dernière présente cependant une EL de plus de 10% sur une zone étendue le long des trajets solaires. La UL est donc finalement uniformément répartie, et même légèrement supérieure sur la moitié Nord de l'hémisphère. La voûte céleste a également une UL relativement uniforme à Quito, avec un gradient de l'horizon au zénith. A Montréal, la moitié Sud de l'hémisphère a une SL nettement supérieure à la moitié Nord et de faibles EL sur une zone moins étendue qu'à Paris ; la UL y est globalement supérieure sur la moitié Sud de l'hémisphère et à l'horizon.

Les paramètres a et b du modèle de (Perez, 1993) traduisent l'importance de la différence de la luminance entre le zénith et l'horizon (cf. §3.2.3) ; si a est positif, la luminance est plus importante au zénith qu'à l'horizon et inversement, plus |a| est important plus l'écart est grand ; plus b est faible, plus la luminance est importante à l'horizon. Les paramètres c et d traduisent respectivement l'intensité lumineuse relative de la voûte céleste et sa concentration dans la direction du Soleil ; plus c est important, plus la luminance relative de la voûte céleste est importante dans la direction du Soleil ; plus d est important, plus la luminance relative de la voûte céleste est importante au voisinage de la direction du soleil. Le Tableau 3.18 présente les valeurs moyennes, minimales et maximales de ces paramètres au cours d'une année pour les trois villes étudiées.

	а		b		С			d				
	moy.	min.	max.									
Quito	-0,2	-1,8	1,3	-0,6	-1,5	-0,2	7,8	0,0	27,1	-2,1	-6,6	0,0
Montréal	-0,6	-1,8	1,2	-0,5	-2,6	0,4	10,4	0,0	39,7	-3,0	-7,3	-0,1
Paris	-0,2	-1,8	1,1	-0,7	-1,7	-0,1	6,1	0,0	21,4	-1,9	-5,5	-0,1

Tableau 3.18. Paramètres de (Perez, 1993) pour les villes de Quito, Montréal et Paris

Ces résultats expliquent en partie la distribution de l'UL sur la voûte céleste. (1) La luminance relative de l'horizon est globalement supérieure à Montréal que dans les deux autres villes étudiées ; le paramètre a est en moyenne près de 2 fois moins important à Montréal ; le paramètre b a une valeur minimale de -2.6 à Montréal contre respectivement -1.5 et -1.7 à Quito et Paris. (2) La lumière est plus concentrée aux alentours du Soleil à Montréal ; le paramètre c est en moyenne nettement supérieur à Montréal, avec une valeur maximale de 39.7 contre respectivement 21 et 27 à Paris et Quito ; le paramètre d est nettement inférieur à Montréal.

(Reinhart, 2011) et (Nabil, 2005) montrent la nécessité de recourir à des indicateurs dynamiques pour évaluer l'éclairage naturel à l'intérieur d'un bâtiment et proposent respectivement les indicateurs *DA* et *UDI*. Ces derniers permettent d'évaluer différents projets architecturaux mais ne donnent aucune

indication sur les directions à privilégier pour favoriser l'accès à la lumière naturelle. Les indicateurs de SL, UL et EL permettent d'évaluer les sources lumineuses extérieures et ainsi de déterminer les plus favorables à l'éclairage naturel ; ils permettent ainsi d'identifier les orientations à privilégier à l'étape du plan masse et d'optimiser la position des fenêtres au plan d'îlot.

### 3.9 Limites de l'étude

L'éclairement des différentes surfaces du modèle géométrique est modélisé suivant la méthode de la radiosité et seules les réflexions lambertiennes sont considérées ; les réflexions spéculaires, notamment les réflexions du rayonnement direct par les surfaces vitrées, ne sont pas prises compte. Leur impact peut s'avérer important ; les réflexions du rayonnement direct sur une façade orientée Sud peuvent notamment permettre d'atteindre le seuil de perception de 300 lux ou de dépasser le seuil d'éblouissement de 2000 lux plus fréquemment au cours d'une année. La prise en compte des réflexions spéculaires implique le recours à une méthode basée sur le lancer de rayons ou hybride dont l'implantation dépasse le cadre de cette thèse.

Les protections solaires sont prises en compte de façon simplifiée et sont considérées telles que proposé par (Nabil, 2005) comme un filtre bloquant l'intégralité du rayonnement direct et 80% du rayonnement diffus. Les stores vénitiens sont sources de réflexions spéculaires, dont l'impact dépend de l'inclinaison et des écarts entre les lames ; la modélisation de ces éléments est complexe et un tel niveau de détail ne peut être envisagé à l'étape du plan masse. L'impact de ce type de protection sur les conditions d'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments peut cependant s'avérer important et notamment réduire considérablement le risque d'éblouissement pour une façade orientée Sud.

L'étude réalisée porte sur un bâtiment à usage de bureau. Les conclusions sont très différentes pour un commerce, où l'ambiance lumineuse est souvent dominée par l'éclairage artificiel pour des raisons fonctionnelles, ou un logement, où le risque d'éblouissement est moins important et ne peut être caractérisé suivant les mêmes critères.

### **3.10 Conclusions**

 $L'UDI_{300}$  et le  $DA_{300}$  permettent l'analyse des conditions d'éclairage naturel par le MOE à l'étape du plan d'îlot. A l'étape du plan masse, le manque de données et de temps pour la saisie des différents scénarios d'aménagement empêche le recours à ces indicateurs. L'objectif principal de ce chapitre est d'établir un lien entre l'environnement lumineux extérieur et ces deux indicateurs afin de permettre une meilleure prise en compte de l'éclairage naturel par le MOE-U dès l'étape du plan masse.

Pour un usage donné, nous avons montré que la visibilité des surfaces extérieures et de la voûte céleste peut être caractérisée dès l'étape du plan masse par l'*OVF* moyen à hauteur du plan de travail sur les zones de premier et second rangs. Les indicateurs de luminances "*suffisante (SL), excessive (EL)* et *utile (UL)*" pour un *OVF* donné sont proposés dans ce chapitre. Le premier est défini comme la part d'une année au cours de laquelle une source lumineuse extérieure émet suffisamment de lumière pour atteindre un éclairement de 300 lux sur le plan de travail ; le deuxième comme la part d'une année au cours de laquelle elle cause un éclairement supérieur à 2000 lux ; le troisième comme la part d'une année au cours de laquelle elle permet un éclairement *utile*, compris entre 300 et 2000 lux.

Dans un contexte dégagé, la lumière issue de sources extérieures domine sur la zone de premier rang. Nous avons montré que, dans ces conditions, le  $DA_{300}$  peut être estimé à partir de la SL moyenne des sources lumineuses visibles depuis la fenêtre du local avec une erreur inférieure à 10% sur la zone de premier rang. Dans un contexte urbain, les réflexions intérieures permettent d'atteindre un éclairement supérieur à 300 lux de 13 à 20% en moyenne de l'année sur la zone de premier rang ; jusqu'à 82% de l'année à mi profondeur pour des revêtements clairs et une orientation Sud. Les indicateurs de luminances suffisante et utile ne permettent pas dans ce cas d'estimer le  $DA_{300}$  et l' $UDI_{300}$ , et donc les éventuelles économies d'énergies sur l'éclairage artificiel des bâtiments du projet. Leur analyse permet cependant d'estimer la quantité de lumière naturelle favorable à un éclairement utile pénétrant à l'intérieur du local ; elle permet de déterminer, et ce dès l'étape du plan masse, les orientations et implantations à privilégier pour favoriser l'accès à la lumière naturelle à l'intérieur des locaux.

Nous avons constaté que l'usage de protections solaires mobiles entraine, à Paris et pour une orientation Sud, une réduction du  $DA_{300}$  de 2 à 40% de l'année à mi profondeur suivant le type et le mode de contrôle des protections utilisées ; de 0 à 28% de l'année pour une orientation Nord. Ces derniers ne sont pas définis avant le plan d'îlot, ce qui rend une nouvelle fois difficile l'estimation du  $DA_{300}$  et donc des consommations d'éclairage artificiel avant cette étape. L'indicateur de luminance excessive permet d'évaluer le risque d'éblouissement causé par une source de lumière extérieure ; il permet ainsi au MOE-U d'identifier dès le plan masse les directions les plus susceptibles de causer l'éblouissement.

Nous avons finalement mis en évidence la variabilité de la distribution des SL, EL et UL sur la voûte céleste en fonction du climat local ; les directions à favoriser pour l'accès à la lumière naturelle sont différentes à Paris, Quito et Montréal. A titre d'exemple, pour un OVF de 4.5%, correspondant au facteur de vue minimal sur la zone de premier rang du local étudié : (1) la voûte céleste présente une UL relativement uniforme à Paris et l'orientation n'a que peu d'effet sur l'accès à la lumière naturelle à l'intérieur du local ; (2) à Montréal, la moitié Sud de l'hémisphère présente une UL supérieure de près de 40 points à sa moitié Nord et une orientation Sud est donc nettement plus favorable à l'éclairage naturel ; (3) à Quito, la voûte céleste présente une UL relativement uniforme et globalement supérieure à celle de Paris et Montréal, avec toutefois des écarts de 10 points entres le zénith et l'horizon.

Dans un contexte urbain, la visibilité de la voûte céleste est limitée mais reste la première source de lumière naturelle. Les indicateurs de SL, EL et UL permettent d'identifier, pour un climat solaire donné, les directions de la voûte céleste les plus favorables à l'accès à la lumière naturelle ; ils permettent ainsi de guider la MOE-U dans la recherche d'une configuration géométrique optimale au regard de l'accès à l'éclairage naturel dès le plan masse. Ces indicateurs permettent par ailleurs de qualifier une ambiance lumineuse urbaine ; ils permettent au MOE-U de déterminer la part d'une année pour laquelle les surfaces extérieures du projet (1) permettent seules un éclairement suffisant et (2) causent un risque d'éblouissement à l'intérieur des bâtiments.

## 4 Caractérisation de l'efficacité énergétique des bâtiments et du confort thermique des espaces extérieurs à l'étape du plan masse

### 4.1 Introduction

Du point de vue de la *simulation thermique dynamique* (STD) des bâtiments et des espaces extérieures, quatre types de transferts de chaleur doivent absolument être pris en compte : par rayonnement, convection, conduction et évapotranspiration. La réflexion proposée dans ce chapitre se concentre sur les aspects radiatifs ; les aspects convectifs (notamment l'impact de la direction et de la vitesse des vents) et les flux de chaleurs latents (évapotranspiration, condensation) ne sont pas étudiés ici.

Le Soleil émet de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques de *courtes longueurs d'ondes* (CLO, inférieures à 4  $\mu$ m). Au cours d'une année, 47% du rayonnement solaire atteignant l'atmosphère sont absorbés par la surface de la Terre et 23% par l'atmosphère, les 30% restants étant réfléchis vers l'espace. L'énergie absorbée est réémise sous forme de rayonnement de *grandes longueurs d'ondes* (*GLO*, supérieures à 4  $\mu$ m) (Beckers, 2012). Le *rayonnement atmosphérique*, le rayonnement GLO du ciel vers la Terre, est inférieur au rayonnement GLO de la Terre vers le ciel ; ce dernier constitue la principale cause du rafraîchissement des surfaces extérieures. (Givoni, 2011) montre notamment que le recours à une toiture rayonnante permet de maintenir la température d'air à l'intérieur d'un bâtiment en-deçà de 21°C pour une température extérieur atteignant 34°C.

La *radiance CLO* de la voûte céleste, la puissance du rayonnement CLO émis dans une direction donnée [W.sr<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>], est communément estimée de façon analogue à sa luminance, suivant le modèle de (Perez, 1993) décrit dans le chapitre précédent. La *radiance GLO* de la voûte céleste est pour sa communément considérée constante dans toutes les directions, on parle d'*isotropie*. Cette dernière peut être caractérisée par une *température de ciel* ou une *émissivité*. (Kruczek, 2015) illustre par des thermographies l'*anisotropie* de l'émissivité de la voûte céleste par temps clair ; il observe à un instant donné des températures de ciel de l'ordre de 10°C à l'horizon et de -50°C au zénith. Le rayonnement atmosphérique est donc plus important à l'horizon qu'au zénith ; le bilan radiatif GLO des surfaces extérieures dépend notamment de leur inclinaison.

Le MOE-U définit dans le plan masse la géométrie extérieure des bâtiments du projet et la répartition des espaces verts et minéralisés ; les orientations retenues à cette étape déterminent l'exposition des surfaces extérieures à la voûte céleste et ont donc un fort impact sur le bilan radiatif de l'enveloppe des bâtiments et les conditions de confort thermique extérieur. Nous analysons dans le chapitre précédent la distribution de la luminance sur la voûte céleste et montrons qu'il est possible d'identifier, pour un climat donné, les directions les plus favorables à l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments. L'objectif principal de ce chapitre est d'identifier les directions de la voûte céleste les plus favorables au rafraîchissement des parois en période chaude et à la limite des pertes de chaleurs par rayonnement en période froide. Les travaux présentés ici constituent une extension de ceux publiés dans (Nahon, 2016).

### 4.2 Etat de l'art

### 4.2.1 Caractérisation du confort thermique extérieur

De nombreux indicateurs sont disponibles pour la caractérisation du confort thermique extérieur (Coccolo, 2016). La plupart d'entre eux repose sur l'estimation du bilan énergétique du corps humain ; de l'énergie qu'il doit fournir pour se maintenir à une température comprise entre 36.5 et 37.5°C. Le rayonnement de courtes et grandes longueurs d'onde absorbé par le corps humain est un facteur

important pour l'estimation, les transferts radiatifs représentants en moyenne 40% du bilan thermique du corps humain (Olgyay, 1962, cf. Figure 4.1.).



Figure 4.1. Relations entre le corps humain et son environnement (Olgyay, 1962, Fig. 36 p.15)

La température radiante moyenne  $T_{mrt}$  [°C] est définie comme "la température uniforme d'une enceinte fictive dont les échanges radiatifs avec le corps humain sont égaux aux échanges radiatifs entre le corps humain et son environnement véritable" (ASHRAE 2001). Elle permet de caractériser l'environnement radiatif extérieur et constitue une composante fondamentale du confort thermique extérieur (Lindberg, 2008, Huang, 2014, Nazarian, 2017). Elle dépend notamment de la visibilité de la voûte céleste et du rayonnement atmosphérique.

#### 4.2.2 Modélisation du rayonnement atmosphérique

#### 4.2.2.1 Estimation de la température de ciel

La luminance monochromatique  $L_{\lambda b}$  [W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>] d'un corps noir à la température T traduit la fraction du rayonnement émis dans une direction et pour une longueur d'onde donnée. On l'obtient suivant la loi de Planck :

$$L_{\lambda b} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1\right)}$$
 Équation 4.1

Avec :

-  $h = 6.626070040.10^{-34}$  [J.s], la constante de Planck ;

- $k = 1.38064852.10^{-23}$  [J/K], la constante de Boltzmann ;
- c = 299792458 [m/s], la vitesse de la lumière.

La Figure 4.2 illustre l'évolution de la luminance monochromatique d'un corps noir pour une température de 5780, 4000, 3000 et 290 K de 0 à 5  $\mu$ m ; La Figure 4.3 l'évolution de la luminance monochromatique d'un corps noir à une température de 290 K de 5 à 12  $\mu$ m.



Figure 4.2 : Luminance monochromatique d'un corps noir de 0 à 5  $\mu m$ 



Figure 4.3. Luminance monochromatique d'un corps noir à température à 290K de 5 à 12  $\mu$ m

Le Soleil peut être assimilé à un corps noir à une température de 5780 K et émet de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques de CLO ; dont près de 50 % dans le spectre du visible (de 380 à 780 nm), avec un maximum à 500 nm (longueur d'onde perçue jaune par l'œil humain), de 50% dans l'infrarouge proche (780 à 4000 nm) et de 1% dans l'ultraviolet lointain (inférieures à 380 nm). L'énergie absorbée par la surface de la Terre, dont la température de surface moyenne est de l'ordre de 290 K, et l'atmosphère est essentiellement restituée dans l'infrarouge lointain (longueurs d'ondes supérieures à 4  $\mu$ m) (Beckers, 2012).

De même que le Soleil, la voûte céleste peut être assimilée à un *corps noir* à température variable ; on parle de *température de ciel*  $T_{sky}$  [K]. On peut également l'assimiler à un *corps gris* à la température de l'air  $T_a$  [K] ; on parle alors d'émissivité du ciel  $\varepsilon_{sky}$ , sa capacité à absorber et restituer l'énergie radiative. La voûte céleste émet de l'énergie vers la Terre sous forme d'ondes électromagnétiques *GLO* ; le *rayonnement atmosphérique*  $\varphi_{sky}$ [W/m<sup>2</sup>], principalement dû à la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, fonction de la température et de l'humidité relative de l'air et de l'altitude. On a :

$$\begin{split} \varphi_{sky} &= \sigma \cdot T_{sky}^{4} & \text{Équation 4.2} \\ \varphi_{sky} &= \varepsilon_{sky} \cdot \sigma \cdot T_{a}^{4} & \text{Équation 4.3} \\ T_{sky} &= \varepsilon_{sky}^{1/4} \cdot T_{a} & \text{Équation 4.4} \end{split}$$

(Angström, 1915) propose un premier modèle permettant d'estimer le rayonnement atmosphérique sur un plan horizontal sur bases de trois paramètres : la température de l'air  $T_a$ , la pression de vapeur d'eau  $V_p$  [hPa] et le degré de couverture nuageuse N [octas : fraction égale à un huitième de la voûte céleste] (cf. Équation 4.5). On en déduit les expressions de  $\varepsilon_{sky}$  et  $T_{sky}$ .

$$\varphi_{sky} = \left(0.82 - 0.25 \cdot 10^{-0.0945V_p}\right) \left(1 + 0.21 \cdot \left(\frac{N}{8}\right)^{2.5}\right) \sigma T_a^{4} \qquad \text{Équation 4.5}$$

Depuis ces travaux, de nombreux modèles ont été proposés pour l'estimation de l'émissivité et de la température moyenne de la voûte céleste. (Tang, 2003) indique cependant que leur corrélation avec les températures observées est globalement faible et que chacun d'eux n'est valide que sous certaines conditions climatiques. Nous discutons dans la suite de ce chapitre de la disponibilité et de la qualité des données sur le rayonnement atmosphérique. Nous proposons lorsqu'elle n'est pas disponible ou peu fiable de recourir à la formule d'Angström pour estimer  $\varepsilon_{sky}$  et  $T_{sky}$ .

#### 4.2.2.2 Prise en compte de l'anisotropie de l'émissivité de la voûte céleste

La température de ciel et son émissivité sont communément considérées constantes dans toutes les directions lors du bilan radiatif *GLO* des surfaces extérieures. Or (Kruczek, 2015) illustre par des thermographies du ciel leur variation en fonction de la hauteur zénithale par temps clair ; il observe des températures de -50°C au zénith contre 10°C à l'horizon. Par temps couvert, la distribution des températures sur la voûte céleste est plus uniforme et proche de 10°C (cf. Figure 4.4).



Figure 4.4 : Températures de ciel observées par Kruczek par temps clair (bleu) et couvert (vert)

Le rayonnement atmosphérique est essentiellement dû à la vapeur d'eau et aux gaz à effets de serre présents dans l'atmosphère. (Bliss, 1961) propose de l'assimiler à une succession de couches parallèles, de teneur en eau variable et avec une teneur en dioxyde de carbone constante. La "longueur"  $\frac{L_S}{cos\theta}$  de l'atmosphère augmente avec l'angle zénithal  $\theta$  (cf. Figure 4.5) ; il établit ainsi une relation entre l'émissivité et la hauteur zénithale.



Figure 4.5. Rayonnement d'une couche de gaz homogène (Bliss, 1961, fig. 4, p.106)

L'émissivité  $\varepsilon$  représente la capacité d'un corps à émettre et à absorber l'énergie radiative ; elle est définie comme le rapport des flux énergétiques  $q_g$  émis par un corps gris et  $q_b$  par un corps noir à la même température (cf. Équation 4.6).

$$\varepsilon = \frac{q_g}{q_b}$$
 Équation 4.6

L'émissivité de l'atmosphère dépend notamment de sa densité volumique de vapeur d'eau et varie en fonction de la longueur d'onde considérée. On parle d'émissivité *monochromatique*  $\varepsilon_{\lambda}$ , définie comme le rapport des flux de longueur d'onde  $\lambda$  émis par un corps gris  $q_{\lambda g}$  et par un corps noir  $q_{\lambda b}$  à la même température (cf. Équation 4.7).

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{q_{\lambda g}}{q_{\lambda b}}$$
 Équation 4.7

On assimile l'atmosphère à un hémisphère de rayon L (cf. Figure 4.6), à une température uniforme T. La Figure 4.7 illustre la variabilité de l'émissivité de l'atmosphère en fonction de sa densité volumique de vapeur d'eau ; la courbe noire correspond au flux  $q_{\lambda b}$  pour une température T = 290 K, la courbe grise correspond au flux  $q_{\lambda g}$  en fonction du produit  $m_w$  de la densité volumique de vapeur d'eau de l'hémisphère  $\rho_w$  [g/m3] et de son rayon L.



Figure 4.6. Rayonnement d'un hémisphère (Bliss, 1961, fig. 3, p.106)



Figure 4.7. Flux énergétique monochromatique de la vapeur d'eau

 $q_{\lambda b}$  [W·m<sup>-2</sup>·m<sup>-1</sup>] est obtenu suivant l'Équation 4.8 :

$$q_{\lambda b} = \int_{\omega \in 2\pi} L_{\lambda b} \cos(\theta) \ d\omega = \frac{2\pi hc^2}{\lambda \left(e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1\right)}$$
 Équation 4.8

 $q_{\lambda q}$  [W·m<sup>-2</sup>·m<sup>-1</sup>] est obtenu suivant l'Équation 4.9 :

$$q_{\lambda g} = \int_{\omega \in 2\pi} \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda b} \cos(\theta) \ d\omega = \left(1 - e^{-K_{\lambda} m_{g}}\right) \frac{2\pi h c^{2}}{\lambda \left(e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1\right)}$$
 Équation 4.9

Avec  $\varepsilon_{\lambda}$  l'émissivité monochromatique de l'hémisphère, fonction du coefficient d'absorption  $K_{\lambda}$  du gaz pour la longueur d'onde considérée et du produit  $m_g = \rho_g L$ :

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - e^{-K_{\lambda}m_g}$$
 Équation 4.10

Les coefficients d'absorption  $K_{\Delta\lambda}$  pour la vapeur d'eau sont supposés constants sur la plage de longueurs d'ondes  $\Delta\lambda$ . On considère les coefficients fournis par (Kondratyev, 1956), tels que cité par (Bliss, 1961) (cf. Tableau 4.1).

Intervalle de longueurs d'ondes [µm]		<i>K</i> <sub>Δλ</sub> [cm²/g]	Intervalle de longueurs d'ondes [μm]		<i>K</i> <sub>Δλ</sub> [cm²/g]
5	5,5	40	19	20	43
5,5	6	198	20	21	23
6	6,5	198	21	22	58
6,5	7	156	22	23	64
7	7,35	46	23	24	75
7,35	8	12,8	24	25	80
8	8,5	3,4	25	26	53
8,5	9	0,1	26	27	93
9	12	0,1	27	28	116
12	13	0,25	28	29	136
13	14	0,84	29	30	152
14	15	1,3	30	31	179
15	16	1,65	31	32	179
16	17	4,4	32	33	179
17	18	17,2	33	34	198
18	19	14	34	35	110

Tableau 4.1. Coefficients d'absorption de la vapeur d'eau proposés par (Kondratyev, 1956, tel que cité par Bliss, 1961)

(Blliss, 1961) propose d'assimiler l'atmosphère à une couche infinie et non à hémisphère. La longueur de l'atmosphère est donc plus importante pour de faibles hauteurs zénithales et tend vers l'infini à l'horizon ; l'émissivité de la voûte céleste tend donc vers 1 à l'horizon. Il considère uniquement l'effet de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et néglige les contributions des autres gaz à effet de serre. La contribution du dioxyde de carbone est limitée à l'intervalle de longueurs d'ondes de 13 à 17  $\mu$ m. Il suppose que l'atmosphère peut être considérée comme une superposition de couches homogènes de densité volumique de CO<sub>2</sub> constante et dont la densité volumique de vapeur d'eau décroit avec l'altitude, ce qui accroit la variation de l'émissivité en fonction de la hauteur zénithale. Il

obtient suivant ce raisonnement la formulation suivante de l'émissivité  $\varepsilon_{\theta}$  de la voûte céleste pour un angle zénithal  $\theta$  avec un facteur b = 1.8:

$$\varepsilon_{\theta} = 1 - \left(1 - \varepsilon_{sky}\right)^{\frac{1}{b \cos(\theta)}}$$
 Équation 4.11

Ce raisonnement pose toutefois un problème : si l'on intègre  $\varepsilon_{\theta}$  sur l'hémisphère obtient une valeur de l'émissivité globale de la voûte céleste supérieure à  $\varepsilon_{sky}$  de près de 5% ; l'intégrale de la formule proposée sur un hémisphère est supérieur à son intégrale sur une couche infinie.

Soit  $q_{g_s}$  le flux énergétique total reçu par une surface dA d'une couche infinie de gaz de masse volumique  $\rho_g$  et d'épaisseur  $L_s$  (cf. Figure 4.5). On a :

$$d^{2}q_{g_{s}} = \left(1 - e^{-\frac{K_{\lambda}m_{g_{s}}}{\cos(\theta)}}\right) \frac{q_{\lambda b}}{\pi} \cos(\theta) \, d\omega \, d\lambda \qquad \qquad \text{Équation 4.12}$$

Avec  $m_{gs} = \rho_g L_s$ .

Soit en coordonnées polaires :

$$d^{2}q_{g_{s}} = \left(1 - e^{-\frac{K_{\lambda}m_{g_{s}}}{\cos(\theta)}}\right) \frac{q_{\lambda b}}{\pi} \cos(\theta) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \, d\lambda \qquad \qquad \text{Équation 4.13}$$

Nous effectuons tel que proposé par (Bliss, 1961) le changement de variable suivant :

$$x = \frac{K_{\lambda}m_{gs}}{\cos(\theta)} = \frac{a}{\cos(\theta)}$$
Équation 4.14

On intègre ensuite l'Équation 4.13 sur une couche infinie :

$$dq_{g_s} = (1 - 2Ei_3(a)) q_{\lambda b} d\lambda$$
 Équation 4.15

Avec :

On en déduit l'expression de l'émissivité monochromatique  $\varepsilon_{\lambda_s}$  d'une couche infinie :

$$\varepsilon_{\lambda_s} = 1 - 2Ei_3(a)$$
 Équation 4.17

On doit nécessairement obtenir le même résultat si l'on considère l'atmosphère comme une couche infinie ou un hémisphère, d'après l'Équation 4.10 on a donc :

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda_{s}} \iff e^{-K_{\lambda}m_{g}} = 2Ei_{3}(a)$$
 Équation 4.18

Ce qui revient à établir un lien entre le produit de la masse volumique et de la longueur d'un hémisphère  $m_g$  et d'une couche infinie  $m_{gs}$ . (Bliss, 1961) teste différentes valeurs du rapport  $b = m_g/m_{gs}$  et retient un facteur de 1.8. (Elsasser, 1942) préfère un facteur de 1.66, qui minimise l'écart entre  $\varepsilon_{\lambda}$  et  $\varepsilon_{\lambda s}$  sur une plage importante de valeurs de a. (Awanou, 1998) retient une valeur de b de 1.8, telle que proposée par Bliss. On remarque que  $1.8 = 1/\cos(56.25^\circ)$ ; (Awanou, 1998) met ainsi en évidence une frontière pour un angle zénithal de 56.25° : au-dessus de cette valeur, l'émissivité directionnelle est inférieure à l'émissivité globale de la voûte céleste et inversement. Il montre une correspondance entre les résultats théoriques obtenus suivant ce modèle et les observations de la radiance du ciel par temps clair pour des angles zénithaux de 0, 60, 75 et 90° réalisées par (Berdhal, 1982) au cours de l'été 1979 par temps clair dans six villes des Etats-Unis.

(Berger, 2003) montre qu'un facteur *b* variable obtenu suivant l'Équation 4.19 permet d'annuler l'écart entre  $\varepsilon_{\lambda}$  et  $\varepsilon_{\lambda_s}$  quelle que soit la valeur de *a*:

#### 22/02/2018

$$b = 1.52 - 0.35 \log_{10}(a)$$

#### Équation 4.19

*a* étant a priori inconnue, il n'est cependant pas possible d'estimer *b* à chaque pas de temps suivant cette formule. Nous montrons dans ce chapitre qu'il est possible d'annuler l'écart entre  $\varepsilon_{\lambda}$  et  $\varepsilon_{\lambda_s}$  suivant un processus itératif et proposons de recourir à ce modèle pour l'estimation du rayonnement GLO de la voûte céleste.

#### 4.2.3 Modélisation du flux GLO du sol et des parois extérieures

La voûte céleste n'est pas la seule source de rayonnement *GLO*; le sol et les surfaces extérieures émettent également dans l'infrarouge lointain. Soit une surface *s* à la température  $T_s$  [K], le flux énergétique *GLO* émis  $\varphi_s$  [W/m<sup>2</sup>] est obtenu suivant :

$$\rho_s = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \qquad \qquad \acute{Equation 4.20}$$

Il y a donc une relation d'interdépendance entre les températures des différentes surfaces d'un environnement urbain ; la température  $T_s$  dépend du flux énergétique *GLO* reçu par la surface *s* qui lui-même dépend du rayonnement GLO émis par *s* vers les surfaces environnantes. Il est donc nécessaire de recourir à un processus itératif afin d'estimer les températures de l'ensemble des surfaces extérieures sur un pas de temps.

Un tel processus induit un coût de calcul important. Les logiciels EnergyPlus (Crawley, 2000) ou encore CityComfort+ (Huang, 2014) estiment la température de surface des parois en supposant le sol ainsi que l'ensemble des surfaces extérieures à la température de l'air. (Evins, 2014) montrent cependant que cette hypothèse induit des erreurs de l'ordre de 18% sur les charges annuelles de chauffage et de climatisation et une différence moyenne de 2°C sur les températures de surfaces obtenues. Ils proposent d'utiliser pour le sol et les surfaces extérieures les températures obtenues au pas de temps précédent. Ils montrent ainsi que l'erreur sur le bilan radiatif GLO d'une paroi est inférieure à 6 W/m<sup>2</sup> pour un pas de temps d'une heure, pour un bilan radiatif maximal de 158 W/m<sup>2</sup> et moyen de 30 W/m<sup>2</sup>.

(Marquez, 2016) rappellent que la température du sol  $T_{gref}$  peut être considérée constante à une profondeur supérieure ou égale à 10 m et égale à la température moyenne de l'air au cours d'une année ; que les variations de la température de surface du sol  $T_{gs}$  sont communément estimées suivant :

$$T_{gs} = T_{gref} + T_p \cos(\omega t + t_0)$$
 Éq. 4.21

Avec  $T_p$  l'amplitude des températures mensuelles moyennes [°C],  $\omega = \frac{2\pi}{365.25 \times 3600}$  la pulsation [rad/s], t le temps [s] et  $t_0$  la phase [s].

Ce modèle ne permet cependant pas d'estimer l'impact des flux GLO et CLO sur l'évolution de la température de surfaces et ne peut rendre compte des variations journalières. La température du sol dépend par ailleurs de la diffusivité thermique des couches qui le composent, de leur capacité à stocker de l'eau, etc.. Ce modèle ne tient pas compte de ces paramètres et ne permet donc pas d'analyser notamment l'impact du taux d'artificialisation des surfaces sur le confort thermique extérieur.

L'objectif principal de ce chapitre est de mettre en évidence l'impact de l'anisotropie de l'émissivité de la voûte céleste sur le bilan GLO des surfaces extérieures ; nous choisissons donc, dans un souci de simplification, de traiter le rayonnement GLO des surfaces extérieures tel que proposé par (Huang, 2014) et considérons les surfaces extérieures et le sol à la température de l'air.

#### 4.2.4 Simulation Thermique Dynamique (STD)

La STD permet de rendre compte de l'impact des flux CLO et GLO sur l'évolution des températures de surfaces extérieures et à l'intérieur des bâtiments. Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature (Kramer, 2012), notamment celles basées sur l'analogie thermique électrique.

#### 4.2.4.1 L'analogie thermique électrique

L'équation de la chaleur en milieu homogène et isotrope et sans génération d'énergie à l'intérieur du système s'écrit :

$$a \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t}$$
 Équation 4.22

Avec  $a [m^2.s^{-1}]$  la *diffusivité thermique* du matériau, qui caractérise la vitesse de propagation d'un flux de chaleur en son sein (cf. Équation 4.23).

$$a = \frac{\lambda}{\rho C}$$
 Équation 4.23

Avec  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] la masse volumique du matériau,  $\lambda$  [W.m<sup>-1</sup>.K] sa conductivité thermique linéique et *C* [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] sa capacité thermique.

Si l'on considère un transfert unidirectionnel l'équation devient :

$$a\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$$
Équation 4.24

En régime permanent :

On en déduit :

$$\frac{\partial T(x)}{\partial x} = A \text{ et } T(x) = Ax + B$$
 Équation 4.26

Soit une paroi homogène d'épaisseur e, dont les températures de surfaces intérieure et extérieure sont respectivement fixée à  $T(0) = T_0$  et  $T(L) = T_L$  (conditions de type Dirichlet). On a :

$$T(x) = \frac{T_0 - T_L}{e} x + T_0$$
 Équation 4.27

Le flux de chaleur  $\varphi$  traversant une paroi homogène d'épaisseur e, de surface S et de conductivité thermique linéique  $\lambda$  [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] s'écrit  $\varphi = -\lambda S \frac{\partial T(x)}{\partial x}$ ; on en déduit :

$$\varphi = \frac{T_0 - T_L}{\frac{e}{\lambda S}}$$
Équation 4.28

La loi d'Ohm définit l'intensité du courant électrique comme le rapport de la tension entre ses bornes, égale à la différence de leur potentiel électrique, et de sa résistance électrique. L'Équation 4.28 est analogue à cette loi, et l'on peut donc représenter une paroi homogène en régime permanent par le schéma électrique équivalent suivant :



Figure 4.8 : Schéma électrique analogue à une paroi homogène en régime permanent

En régime dynamique, un élément thermiquement mince de résistance R [m<sup>2</sup>.K/W] et de capacité C [J/(kg.K)] est représenté de la façon suivante :



Figure 4.9 : Représentation d'un corps thermiquement mince

Si l'on souhaite analyser l'évolution de la température à l'intérieur d'une paroi composite, (Ngendakumana, 1988) montre qu'il est nécessaire de décomposer chacune des couches homogènes en n éléments minces tel que :

$$n^2 \ge \frac{4RC}{\pi \cdot \Delta t}$$

Équation 4.29

Avec :

- $R [m^2.K/W]$  la résistance thermique globale de la couche ;
- C [J/(kg.K)] la capacité thermique massique de la couche ;
  - $\Delta t$  [s] le pas de temps de la modélisation.

Soit une paroi composée de 20 cm de béton isolée de 10 cm de polystyrène expansé (PES) et revêtue d'une épaisseur de 1 cm de plâtre (cf. Table 1). Pour un pas de temps horaire, chacune des couches de matériaux doit respectivement être divisée décomposée en 1, 2 et 5 éléments minces.

Matériau	λ [W/(m.K)]	<i>c</i> [J/(kg.K)]	ho [kg/m <sup>3</sup> ]
Béton	1.75	920	2200
PES	0.04	1380	30
Plâtre	0.35	800	1000

Table 1 : Caractéristiques des matériaux

#### 4.2.4.2 Modélisation de l'évolution de la température dans une paroi opaque

La paroi décrite précédemment est décomposée en n éléments minces placée au contact de l'air à la température  $T_{ext}$  à l'extérieur et  $T_{int}$  à l'intérieur. Elle est soumise aux flux radiatifs  $\Phi_{ext}$  et  $\Phi_{int}$ [W/m<sup>2</sup>] respectivement sur ses faces intérieure et extérieure. La Figure 4.10 représente le schéma électrique analogue à la paroi, avec :

- $C_c$  [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] la capacité thermique massique du matériau constitutif de la couche homogène *c* ;  $\rho_c$  [kg/m<sup>3</sup>] sa masse volumique et  $e_c$  [m] son épaisseur ;
- $C_i = C_c \rho_c e_c / n_c$  [J.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] la capacité thermique surfacique du nœud *i* de la couche *c*;  $k_i = \frac{\lambda_i}{\Delta x_i}$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] la conductivité thermique surfacique entre les nœuds *i* 1 et *i*, avec  $\lambda_i$  la conductivité thermique linéique du matériau et  $\Delta x_i$  son épaisseur entre i - 1 et i;
- $h_i$  et  $h_e$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] les coefficients de convection intérieur et extérieur ;  $k'_0 = \frac{k_0 h_e}{k_0 + h_e}$  et  $k'_n = \frac{k_n h_i}{k_n + h_i}$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] les conductivités surfaciques entre les nœuds 1 et n et l'air extérieur et intérieur.



Figure 4.10 : Représentation d'une paroi décomposée en n éléments minces

22/02/2018

Le système d'équations régissant l'évolution de la température au sein de la paroi est obtenu en appliquant la loi de Kirchhoff sur chacun de ses nœuds :

$$C_{1} \frac{dT_{1}}{dt} = k'_{0}(T_{ext} - T_{1}) - k_{1}(T_{1} - T_{2}) + k'_{0}/h_{e} \Phi_{ext}$$

$$C_{i} \frac{dT_{i}}{dt} = k_{i-1}(T_{i-1} - T_{i}) - k_{i}(T_{i} - T_{i+1})$$

$$E_{n} \frac{dT_{n}}{dt} = k_{n-1}(T_{n-1} - T_{n}) - k'_{n}(T_{n} - T_{int}) + k'_{n}/h_{i} \Phi_{int}$$

Sous forme matricielle :

$$\frac{dT}{dt} = AT + U \qquad \qquad \acute{Eq. 4.31}$$

Avec :

On choisit de résoudre ce système d'équations différentielles par la méthode des différences finies, suivant un schéma d'Euler implicite pour des raisons de stabilité. On écrit :

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{T(t) - T(t-1)}{\Delta t}$$
 Éq. 4.32

En adoptant une notation indicielle :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T^t - T^{t-1}}{\Delta t}$$
 Éq. 4.33

On obtient à partir de l'équation Éq. 4.31 :

$$T^{t-1} = (Id - A\Delta t) T^t - U^t \Delta t$$
 Éq. 4.34

On pose  $B = (Id - A\Delta t)$ . Le système d'équations est résolu en posant :

$$T^{t} = B^{-1} T^{t-1} + B^{-1} U^{t} \Delta t$$
 Éq. 4.35

La Figure 4.11 représente l'évolution de la température ainsi obtenue au sein de la paroi décrite précédemment pour une période de 24 heures (de clair à foncé, chaque courbe représentant un pas de temps de une heure). La paroi, initialement à une température uniforme de 15°C, est placée au contact de l'air à une température extérieure de 5°C et intérieure de 18°C et soumise à flux de 100 W/m<sup>2</sup> à l'extérieur et de 10 W/m<sup>2</sup> sur sa face intérieure.



*Figure 4.11. Evolution de la température au sein d'une paroi soumise à saut de température.* 

#### 4.2.4.3 Modélisation d'un bâtiment

Dans le cas de la modélisation d'un bâtiment, la température intérieure est laissée libre afin d'analyser l'impact des flux atteignant les parois extérieures et pénétrant à l'intérieur du logement sur son évolution. Le schéma électrique analogue à un bâtiment vide composé de n parois comptant chacune  $n_p$  éléments minces est représenté Figure 4.12.



Figure 4.12 : Représentation d'une paroi décomposée en n éléments minces

Chaque paroi p est représentée par un schéma analogue à celui présenté dans le paragraphe précédent, avec  $T_{p,i}$  [°C] la température du nœud i de la paroi ;  $C_{p,i}$  [J.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] sa capacité thermique surfacique ;  $k_{p,i}$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] la conductivité thermique surfacique entre les nœuds i - 1 et i ;  $\Phi_{p,ext}$  et  $\Phi_{p,int}$  [W.m<sup>-2</sup>] les flux radiatifs atteignant respectivement ses faces intérieure et extérieure.

L'air intérieur est représenté par le nœud à la température  $T_{int}$  [°C].  $C_{int}$  [J.K<sup>-1</sup>] représente la capacité thermique de son volume  $V_{int}$  [m<sup>3</sup>]. On a  $C_{int} = c_{air} \rho_{air} V_{int}$  [J.K<sup>-1</sup>], avec  $c_{air}$  [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] la capacité thermique massique et  $\rho_{air}$  [kg.m<sup>-3</sup>] la masse volumique de l'air. La capacité thermique et la masse volumique de l'air dépendent des conditions de sa pression et de température ; elles sont ici considérées constantes avec  $c_{air} = 1005$  [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] et  $\rho_{air} = 1.413$  [kg.m<sup>-3</sup>]

Le nœud air intérieur est connecté (1) à chacune des parois par leur coefficient de convection superficiel  $h_{p,i}$  [W.K<sup>-1</sup>]; (2) au nœud représentant l'air extérieur à la température  $T_{ext}$  [°C] au travers de la conductivité thermique variable UA [W.K<sup>-1</sup>]. Cette dernière représente les transferts de chaleur au travers des parois sans inertie (typiquement les fenêtres) et par ventilation :

$$UA = \sum_{p} S_{p,g} U_{p,g} + \frac{n_{vent}}{3600} C_{int}$$
 Éq. 4.36

Avec  $S_{p,g}$  [m<sup>2</sup>] la surface vitrée de la paroi p et  $U_{p,g}$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] son coefficient de conductivité thermique,  $n_{vent}$  [vol.hr<sup>-1</sup>] le taux de renouvellement d'air par infiltration, ventilation mécanique et naturelle.

L'éventuel flux  $H_{int}$  [W] de chauffage (>0) ou de climatisation (<0) permet de maintenir la température d'air intérieur entre une température de consigne pour le chauffage et la climatisation.

Chacune des parois est soumise aux flux radiatifs  $\Phi_{p,ext}$  [W/m<sup>2</sup>] sur leur face extérieure et  $\Phi_{p,int}$  [W/m<sup>2</sup>] sur leur face intérieure.  $\Phi_{p,ext}$  correspond au bilan des flux radiatifs CLO et GLO sur chacune des parois ;  $\Phi_{p,int}$  aux éventuelles flux radiatifs du système de chauffage et au rayonnement CLO pénétrant à l'intérieur du local et atteignant la paroi.

On applique une nouvelle fois les lois de Kirchhoff sur chacun des nœuds des différentes parois ainsi que sur le nœud air intérieur. Les nœuds 1 à  $n_p$  d'une paroi p sont régis par le système d'équations suivant :

$$C_{p,1} \frac{dT_{p,1}}{dt} = k'_{p,0} (T_{ext} - T_{p,1}) - k_{p,1} (T_{p,1} - T_{p,2}) + \frac{k'_{p,0}}{h_{p,e}} \Phi_{p,ext}$$

$$C_{p,i} \frac{dT_{p,i}}{dt} = k_{p,i-1} (T_{p,i-1} - T_{p,i}) - k_{p,i} (T_{p,i} - T_{p,i+1})$$

$$E_{p,n_p} \frac{dT_{p,n}}{dt} = k_{p,n_p-1} (T_{p,n_p-1} - T_{p,n_p}) - k_{p,n_p} (T_{p,n_p} - T_{int}) + \frac{k'_{p,n_p}}{h_{p,i}} \Phi_{p,int}$$

Le nœud intérieur est régi par l'équation suivante :

$$C_{int} \frac{dT_{int}}{dt} = \sum_{p} \left( k'_{p,n_{p}} \left( T_{p,n_{p}} - T_{int} \right) - \frac{k'_{p,n_{p}}}{k_{p,n_{p}}} \Phi_{p,int} \right) S_{p} - UA \left( T_{int} - T_{ext} \right) + H_{int}$$
 Éq. 4.38

Le système d'équations régissant le comportement thermique du bâtiment peut s'écrire sous forme matricielle:

$$\frac{dT}{dt} = AT + U \qquad \qquad \acute{Eq. 4.39}$$

On a :

$$U = \begin{pmatrix} u_{1,1} \\ \cdots \\ u_{1,n_1} \\ \cdots \\ u_{p,i} \\ \cdots \\ u_{n,n_n} \\ u_{int} \end{pmatrix}$$
 avec :  

$$u_{p,1} = \frac{k'_{p,0} T_{ext}}{C_{p,1}} + \frac{k'_{p,0}/h_{p,e} \Phi_{p,ext}}{C_{p,1}} \text{ et } u_{p,n_p} = \frac{k'_{p,n_p} T_{int}}{C_{p,n_p}} + \frac{k'_{p,n_p}/h_{p,i} \Phi_{p,int}}{C_{p,n_p}};$$

Le système ainsi obtenu compte  $\sum_p n_p + 1$  équations et  $\sum_p n_p + 2$  inconnus  $(T_{p,i}; T_{int} \text{ et } H_{int})$ ; il ne peut être résolu directement. On fixe dans un premier temps  $H_{int} = 0$  et l'on vérifie sur chaque pas de temps que la température intérieure est comprise entre les températures de consigne. Si  $T_{int}^t < T_{heat}$  ou  $T_{int}^t > T_{cool}$ , on fixe  $T_{int}^t = T_{heat}$  ou  $T_{int}^t = T_{cool}$  et l'on estime la température des nœuds  $T_{p,i}$  suivant la méthode décrite au §4.2.4.2. Le flux convectif idéal  $H_{int}$  permettant d'atteindre la température de consigne est ensuite obtenu suivant l'expression suivante :

$$H_{int}^{t} = \frac{C_{int}}{\Delta t} \left( T_{int}^{t} - T_{int}^{t-1} \right) + UA^{t} \left( T_{int}^{t} - T_{ext}^{t} \right) - \sum_{p} \left( k_{p,n_{p}}^{\prime} \left( T_{p,n_{p}}^{t} - T_{int}^{t} \right) - \frac{k_{p,n_{p}}^{\prime}}{k_{p,n_{p}}} \Phi_{p,int}^{t} \right) S_{p}$$
Éq. 4.40

La méthode proposée est stable quelle que soit le pas de temps considéré et permet une représentation suffisamment fidèle du comportement thermique des bâtiments pour l'analyse de leur efficacité énergétique et de l'évolution des températures extérieures. Elle repose toutefois sur l'inversion de la matrice A de dimensions  $(\sum_p n_p + 1)^2$ ; cette étape est couteuse en temps de calcul et le recours à des modèles simplifiés peut s'avérer dans la logique de l'analyse d'un projet comptant plusieurs centaines de bâtiments.

#### 4.2.4.4 Modèles simplifiés

(Laret, 1981) propose de ramener le bâtiment à un système de second ordre. Il introduit le paramètre d'accessibilité  $\theta$  repris par (Lorenz, 1982), qui traduit le potentiel de mobilisation de la capacité de la paroi par l'extérieur. Chaque paroi est représentée par sa capacité thermique totale C et connectée au nœud air intérieur par une fraction  $\theta$  de sa résistance globale R (cf. Figure 4.13).



Figure 4.13 : Schéma simplifié d'une paroi multicouche

Le bâtiment est ensuite ramené à un système à deux constantes de temps (cf. Figure 4.14). L'ensemble des parois extérieures est représenté par une unique capacité  $C_w$  et un couple de résistances. Le nœud intérieur à la température  $T_{int}$  est lié à la capacité thermique du volume d'air intérieur et de l'ensemble des cloisons internes sont représentés par la capacité  $C_{int}$ . Il est connecté à la température extérieure au travers de la conductivité thermique UA représentative des échanges au travers des parois sans inertie et par ventilation.



Figure 4.14 : Schéma simplifié d'un bâtiment, modèle de second ordre

On obtient ainsi un système à deux équations différentielles pour la modélisation de l'ensemble du bâtiment dont la résolution permet de suivre l'évolution de la température de l'air intérieur en fonction de sollicitations extérieures. Ce modèle ne permet cependant pas l'obtention de températures de surfaces extérieures. L'ensemble des parois sont par ailleurs connectées sur une unique température extérieure  $T_{ext}$ , ce qui ne permet pas de prendre en compte la température du sol pour le calcul des transferts thermique au travers des planchers.

(Ngendakumana, 1988) propose de prendre en compte les échanges GLO et CLO par un incrément de la température extérieure, au moyen d'une température extérieure globale équivalente. (Kämpf, 2007) introduisent le nœud  $T_{se}$  pour une meilleure prise en compte des transferts radiatifs et convectifs au niveau de la surface extérieure (cf. Figure 4.15). Ils ajoutent un lien entre la température de l'air extérieur  $T_{ext}$  et la température de surface extérieure  $T_{se}$  moyenne de l'ensemble des parois, utilisée lors du calcul du bilan radiatif des parois.



Figure 4.15 : Modèle à deux nœuds proposé (Kämpf, 2007)

Ce modèle permet une estimation fiable du bilan thermique d'un bâtiment pour l'estimation de ses besoins en chauffage et en rafraîchissement. Les températures de surfaces extérieures obtenues correspondent cependant à une température moyenne et peuvent donc difficilement être utilisées pour la caractérisation du confort thermique extérieur. L'ensemble des parois étant représenté par une unique branche, il est par ailleurs impossible de considérer que l'une d'entre elles, notamment le sol, est en contact avec un milieu à une température différente de  $T_{ext}$ .

(Walter, 2015) proposent une adaptation de ce modèle permettant de dépasser ces limites (cf. Figure 4.16). Le plancher et la toiture sont chacun représentés par une branche indépendante, associés chacun à une capacité thermique et raccordés à une température différente de celle de l'air extérieur, par exemple celle d'un vide sanitaire ou des combles. Les parois verticales sont chacune représentées par une branche mais connectées à une unique capacité thermique  $C_w$ , ce qui permet d'obtenir pour chaque paroi p une température de surface extérieure différenciée  $T_{p,se}$ . L'objectif principal de ce chapitre est de proposer une analyse de l'impact de l'anisotropie de l'émissivité de la voûte céleste notamment sur les températures de surfaces extérieures ; afin d'éviter toute source d'erreur due à une simplification du modèle, nous choisissons de travailler dans la suite de cette thèse avec un modèle à n nœuds tel que défini dans les paragraphes précédents.



Figure 4.16. Modèle à quatre nœuds proposé par (Walter, 2015)

# 4.3 Définition d'un modèle pour le calcul du rayonnement atmosphérique anisotrope

### 4.3.1 Estimation de l'émissivité totale de la voûte céleste

La mesure de la température du ciel peut se faire directement via un thermomètre infrarouge ou indirectement via un pyrradiomètre. (Tang, 2003) indique cependant que ces deux instruments sont couteux et nécessitent un calibrage fréquent; les observatoires météorologiques ne sont pas systématiquement équipés de ces appareils et cette donnée n'est donc pas toujours disponible. Nous avons dans la suite de cette thèse recours aux bases de données météorologiques horaires disponibles sur le site internet https://energyplus.net/weather. Chacune des données fournies est associée à une source et une classe d'incertitude, avec une distinction entre les données correspondant aux rayonnements solaire et atmosphérique et les autres (Crawley, 1999). La source du rayonnement infrarouge sur un plan horizontal est inconnue pour les fichiers étudiés (cf. Tableau 4.2, indicateur "?"), avec une incertitude de 35 à 50% (cf. Tableau 4.3, classe "9") ou considérée comme « non utilisable » (cf. Tableau 4.3, classe "0"). On ne peut donc a priori s'appuyer sur cette donnée dans nos modélisations. Les variables de la formule d'Angström, la température de l'air, la pression de vapeur d'eau et le degré de couverture nuageuse sont directement issus d'observations (cf. Tableau 4.4, indicateurs "A" à "C"), avec une incertitude propre aux instruments de mesures (cf. Tableau 4.5, classes 7 à 8). Il apparaît donc raisonnable de s'appuyer sur ces données pour l'estimation du rayonnement infra-rouge.

Indicateur	Définition							
Source	Demition							
А	Rayonnement solaire mesuré après 1976, telle que reçu de l'observatoire							
В	Identique à "A", avec cependant une calibration des données							
c	Rayonnement global horizontal mesuré avant 1976 (le direct et le diffus ne sont pas mesurés avant							
C	cette date), corrigé d'heure solaire à heure légale, usuellement calibré							
	Rayonnement global horizontal estimé à partir des données sur le direct et le diffus							
D	(global=diffus+direct*cos(angle zenithal))							
-	Rayonnement solaire modélisé à partir du couvert nuageux observé et de l'épaisseur optique des							
<b>-</b>	aérosols, estimé à partir d'une mesure du rayonnement direct normal							
E	Rayonnement solaire modélisé à partir du couvert nuageux interpolé et de l'épaisseur optique des							
<b>F</b>	aérosols, estimé à partir d'une mesure du rayonnement direct normal							
G	Rayonnement solaire modélisé à partir du couvert nuageux observé et de l'épaisseur optique des							
9	aérosols, estimé à partir de relations géographiques							
ц	Rayonnement solaire modélisé à partir du couvert nuageux interpolé et d'une estimation de							
п	l'épaisseur optique des aérosols							
I	Illuminance ou Luminance modélisée à partir du rayonnement solarie mesuré ou modélisé							
?	Aucune des sources précédentes. Utilisée notamment pour les données manquantes ou nocturnes							

Tableau 4.2. Indicateurs de source pour les données de rayonnement (Crawley, 1999)

Classe d'Incertitude	Plage d'incertitude (%)
1	Classe non utilisée
2	2 - 4
3	4 - 6
4	6-9
5	9 - 13
6	13 - 18
7	18 - 25
8	25 - 35
9	35 - 50
0	Non utilisable

Tableau 4.3. Classes d'incertitude pour les données de rayonnement (Crawley, 1999)

Indicateur	Définition					
Source						
Α	Donnée telle que reçue de l'observatoire, convertie aux unités SI					
В	Données interpolées de façon linéaire					
С	Données interpolées de façon non linéaire pour boucher les trous d'une durée de 6 à 47 heures					
D	Indicateur non utilisé					
E	Donnée modélisée ou estimée					
	Quantité d'eau précipitabel calculée à partir de la pression de vapeur; épaisseur optique des aérosols					
г	estimées par des relations géographiques					
?	Aucune des sources précédentes. Utilisée notamment pour les données manquantes					

Tableau 4.4. Indicateurs de source pour les données météorologiques (Crawley, 1999)

Classe d'Incertitude	Plage d'incertitude (%)
1-6	Classes non utilisées
7	Incertitude associée aux instruments de mesures utilisés
8	Incertitude plus importante que "7" du fait de l'interpolation des données
9	Incertitude plus importante que "8" ou inconnue
0	Non utilisable

Tableau 4.5. Classes d'incertitude pour les données météorologiques (Crawley, 1999)

La formule proposée par Angström prend en compte l'étendue du couvert nuageux et nous montrons dans les paragraphes suivants que l'estimation de l'émissivité totale de la voûte suivant cette formule semble correcte par temps clair et pour un ciel uniformément couvert. Nous choisissons donc de recourir à cette formule pour l'estimation de l'émissivité totale  $\varepsilon_{sky}$  de la voûte céleste quelles que soient les conditions de ciel quand la donnée du fichier météo est 'non utilisable'. Dans le cas où rayonnement infrarouge sur un plan horizontal correspond à une donnée mesurée il convient de l'utiliser.

La Figure 4.17 propose une comparaison du rayonnement atmosphérique issu des données de l'observatoire de Paris-Orly le rayonnement atmosphérique et calculé suivant la formule d'Angström. La période sélectionnée s'étend du 10 au 25 janvier et présente une alternance entre journées couvertes et dégagées.  $V_p$  est calculée à partir de l'expression proposée par (Arden Buck, 1981), avec  $R_h$  [%] l'humidité relative et  $T^{\circ}_a$  (exprimée ici en [°C]) la température de l'air extérieur :



Figure 4.17: Comparaison du rayonnement atmosphérique calculé (rouge) et issu de la base de données (magenta)

La corrélation entre ces deux courbes semble indiquer que le rayonnement atmosphérique est modélisé suivant un modèle similaire dans les fichiers de données météorologiques utilisés et nous conforte dans le choix de ce modèle.

#### 4.3.2 Estimation de l'émissivité directionnelle de la voûte céleste

La formule d'Angström permet, quand aucune mesure n'est disponible, d'estimer l'émissivité globale de la voûte céleste  $\varepsilon_{sky}$ . La formule proposée par (Bliss, 1961) permet d'estimer à partir de cette donnée son émissivité  $\varepsilon_{\theta}$  pour un angle zénithal  $\theta$ :

$$\varepsilon_{\theta} = 1 - \left(1 - \varepsilon_{sky}\right)^{\frac{1}{b \cos(\theta)}}$$
 Équation 4.42

Comme indiqué dans le §4.2.2.2, pour un coefficient *b* constant de 1.8, tel que proposé par (Bliss, 1961), l'intégrale suivant cette formule de  $\varepsilon_{\vartheta}$  sur la voûte céleste donne une valeur de l'émissivité totale  $\varepsilon'_{sky}$  légèrement supérieure à  $\varepsilon_{sky}$ ; le rayonnement atmosphérique calculé suivant cette formule est donc légèrement supérieur à celui obtenu en considérant un ciel isotrope.

(Berger, 2003) indiquent qu'un coefficient de 1.66, tel que proposé par (Elsasser, 1942), minimise cette écart au cours d'une année. Ils montrent qu'il est nécessaire pour annuler cet écart de s'appuyer sur un coefficient *b* variable, dépendant du produit  $a = K_{\lambda}m_{g}$  (cf. Équation 4.19). A titre indicatif l'écart

moyen entre  $\varepsilon_{sky}$  et  $\varepsilon'_{sky}$  au cours d'une année pour la ville de Paris est de 4.9% (de 2 à 5.3%) pour un coefficient *b* de 1.8 ; de 2.8% (de 1.3 à 3.1%) pour un coefficient *b* de 1.66.

On souhaite comparer le flux GLO reçu par une paroi en considérant un ciel isotrope et anisotrope. Il est donc nécessaire de conserver l'égalité  $\varepsilon_{sky} = \varepsilon'_{sky}$ , ce qui revient à définir sur chaque pas de temps un coefficient *b* tel que  $e^{-b a} = 2Ei_3(a)$  (cf. §4.2.2.2).

(Elsasser, 1942) proposent des valeurs tabulées de  $2Ei_3$  (cf. Tableau 4.6). On établit sur cette base les valeurs du coefficient *b* tel que  $e^{-b a} = 2Ei_3(a)$  sur une large plage de *a* (cf. Figure 4.18).

а	2EI₃(a)	а	2EI₃(a)	а	2EI₃(a)	а	2EI₃(a)
0	1	0,3	0,6001	1	0,2194	2,4	0,0368
0,01	0,9806	0,35	0,5553	1,1	0,1918	2,5	0,0325
0,02	0,9619	0,4	0,5146	1,2	0,1679	2,6	0,0289
0,03	0,944	0,45	0,4773	1,3	0,1472	2,7	0,0256
0,04	0,9266	0,5	0,4432	1,4	0,1291	2,8	0,0227
0,05	0,9098	0,55	0,4119	1,5	0,1134	2,9	0,0201
0,06	0,8935	0,6	0,3831	1,6	0,0998	3	0,0178
0,07	0,8777	0,65	0,3566	1,7	0,0879	3,5	0,0099
0,08	0,8622	0,7	0,3321	1,8	0,0774	4	0,0055
0,09	0,8472	0,75	0,3095	1,9	0,0683	4,5	0,0031
0,1	0,8326	0,8	0,2886	2	0,0603	5	0,0017
0,15	0,7646	0,85	0,2693	2,1	0,0532	6	0,0006
0,2	0,7039	0,9	0,2518	2,2	0,047	7	0,0002
0,25	0,6494	0,95	0,2348	2,3	0,0416	8	0,0001

Tableau 4.6 : Valeurs tabulées de 2Ei<sub>3</sub> proposées par (Elsasser, 1942)



Figure 4.18 : valeurs du coefficient b en fonction de a

Le coefficient *b* est systématiquement compris entre 1.15 et 1.95. Nous proposons de l'estimer par un processus itératif ; on estime à chaque pas de temps l'écart  $\Delta \varepsilon = |\varepsilon'_{sky} - \varepsilon_{sky}|$  pour différentes valeurs de *b* comprises entre 1.15 et 1.95 suivant un pas déterminé et l'on retient la valeur de *b* pour laquelle on obtient la plus petite valeur de  $\Delta \varepsilon$ .

Pour le fichier de données météorologiques de la ville de Paris :

- pour un pas de 0.01,  $\Delta \varepsilon$  est limité à 0.1% pour une valeur moyenne annuelle  $\Delta \varepsilon_{mean}$  de 0.03%;
- pour un pas de 0.1,  $\Delta \varepsilon$  est limité à 0.9% pour une valeur moyenne  $\Delta \varepsilon_{mean}$  de 0.5%.

Les valeurs de *b* obtenues sont systématiquement comprises entre 1.35 et 1.57 pour la ville de Paris. On note des résultats similaires pour les villes de Quito (0.15°S, Equateur) et Montréal (45.47°N), avec des valeurs de *b* atteignant 1.62 à Montréal, caractérisée par un hiver sec et dégagé, et donc par de faibles valeurs de *a*. (Awanou, 1998) remarque que *b* peut s'écrire sous la forme de l'inverse d'un cosinus et met ainsi en évidence une frontière pour un angle zénithal de  $\theta_l$  de 56.25° pour un coefficient *b* de 1.8  $\left(=\frac{1}{\cos(\theta_l)}\right)$ ; pour un angle zénithal supérieur à  $\theta_l$ ,  $\varepsilon_{\theta}$  est supérieur à  $\varepsilon_{sky}$  et inversement. (Berger, 2003) montrent que pour un coefficient *b* de 1.6 la frontière se situe à 51.3°. Le coefficient *b* est variable et dépend notamment du couvert nuageux. Pour les fichiers étudiés, la frontière se situe entre 42.2° et 51.8° et  $\theta_l$  augmente avec la teneur en eau de l'atmosphère.

En conclusion de ce paragraphe, nous proposons d'estimer tout au long de l'année  $\varepsilon_{\theta}$  à partir de la formule proposée par (Bliss, 1961, cf. Équation 4.10). On considère un coefficient *b* variable, calculé avec un pas de 0.1 sur l'intervalle 1.15 - 1.95.  $\varepsilon_{sky}$  est issue du fichier de données météorologiques lorsqu'elle correspond à une donnée mesurée, dans le cas contraire elle est obtenue suivant le modèle de (Angström, 1915, cf. Équation 4.5).

## 4.4 Analyse de l'impact du couvert nuageux sur la distribution de l'émissivité sur la voûte céleste

La Figure 4.19 représente l'évolution de la température de ciel au cours d'une année pour la ville de Paris et illustre les impacts respectifs de la température de l'air et du couvert nuageux sur la température du ciel. On observe des valeurs oscillant entre -29 et 25°C pour une température de l'air comprise entre -6° et 30°C.



Figure 4.19: Mise en parallèle de l'évolution de la température du ciel (bleu), de l'air (cyan) et du couvert nuageux (gris) du 10 au 25 janvier à Paris

Par temps couvert  $\varepsilon_{sky}$  tend vers 1, et donc  $T_{sky}$  tend vers  $T_a$ . Les écarts observés entre les températures d'air et de ciel sont dus à la pression de vapeur d'eau de l'atmosphère  $V_p$  (cf. Équation 4.5). Pour la ville de Paris, cette dernière oscille entre 2.5 et 23.5 hPa au cours d'une année. Les valeurs minimales et maximales de  $\varepsilon_{sky}$  par temps couvert sont donc respectivement de 82 et 99% ; soient un écart minimal de 2°C et maximal de 14°C pour une température d'air extérieur de 15°C. Par temps clair, la température du ciel chute drastiquement. Les valeurs minimale et maximale de  $\varepsilon_{sky}$  sont respectivement de 67 et 82% ; soient un écart minimal entre la température de ciel et celle de l'air de 14°C et maximal de 27°C pour une température d'air extérieur de 15°C.

La température de ciel est systématiquement inférieure à la température de l'air ; le bilan radiatif *GLO* d'un corps à température ambiante est donc systématiquement négatif. Les parois des bâtiments, les surfaces extérieures sont rafraîchies par le ciel tout au long de l'année. Les habitants du désert perse profitaient notamment de ce phénomène pour produire de la glace en exposant de l'eau à la voûte céleste de nuit, pour des températures extérieures atteignant 9°C (Clark, 1981).

Pour une couverture nuageuse de 8 octas et une forte humidité relative de l'air,  $\varepsilon_{sky}$  tend vers 1 et donc  $\varepsilon_{\theta}$  tend 1 quelle que soit l'angle zénithal ; le modèle proposé dans le paragraphe précédent semble donc valide pour les cas extrêmes. La Figure 4.20 illustre la distribution des températures de ciel par temps dégagé et couvert à Paris en hiver. La voûte céleste est divisée en 1000 *tuiles* suivant la partition proposée par (Beckers, 2014b), on considère chacune des tuiles à une température uniforme, égale à la température calculée en son centre.



Par temps clair, la température de ciel est de -42°C au zénith contre 7°C à l'horizon pour une température d'air extérieur de 7.2°C; par temps couvert, la température de ciel est relativement uniforme et proche celle de l'air. On retrouve ainsi pour ces deux cas ( $\varepsilon_{sky} = 68\%$  et 97%) un comportement similaire à celui observé par (Kruczek, 2015, cf. Figure 4.4).

La prise en compte de l'impact du couvert nuageux sur la répartition de la température sur le ciel est difficile du fait de la variété des types cumulus et de leur altitude. On remarque que  $\varepsilon_{sky}$  peut atteindre des valeurs de 82% :

- pour une couverture nuageuse de 8 octas, dans le cas où  $V_p$  est faible ;
- pour une couverture nuageuse de 0 octas, dans le cas où  $V_p$  est forte.

Si l'on applique la formule proposée dans le §4.3.2, on observe donc un gradient de température similaire pour un ciel couvert et dégagé (cf. Figure 4.21).



Figure 4.21 : Température du ciel par temps dégagé (gauche) et partiellement couvert (droite)

Il n'existe pas à ce jour de modèle permettant d'estimer la distribution des températures de ciel par temps couvert et le manque de données rend difficile l'analyse de ce-dernier résultat. Les différences de températures entre le zénith et l'horizon par temps clair sont cependant si importantes qu'il apparaît nécessaire de prendre en compte cette variation lors du bilan énergétique de l'enveloppe d'un bâtiment. Le modèle proposé dans le paragraphe précédent permet de rendre compte de ce phénomène pour un temps clair et fortement nuageux ; si le comportement obtenu pour un ciel partiellement couvert n'est pas fidèle à la réalité, il apparaît toutefois raisonnable de préférer cette répartition de l'émissivité sur la voûte céleste à une répartition isotrope.

## 4.5 Comparaison de la distribution de la température de ciel sur la voûte céleste sous différents climats

(Clark, 1981) et (Argiriou, 1992) illustrent l'impact du climat local sur le rayonnement atmosphérique ; ils montrent notamment qu'il permet le rafraîchissement passif des bâtiments dans la plupart des villes du sud-ouest de l'Europe mais présente un faible potentiel dans le sud-est des Etats-Unis.

La ville de Paris est caractérisée par un hiver relativement froid et humide, avec une température d'air moyenne de 5°C et une humidité relative de 80%. La Figure 4.22 illustre la distribution des températures de ciel en hiver et en été, par temps couvert et dégagé. La valeur minimale de  $\varepsilon_{sky}$  est de 78% en été contre 67% en hiver ; la température de ciel est globalement plus froide en hiver et la différence de température entre le zénith et l'horizon plus importante.



La Figure 4.23 reprend la comparaison proposée au §3.8 de l'évolution du couvert nuageux au cours d'une année à dans les villes de Quito (0.15°S, Equateur), Montréal (45.47°N) et Paris (48.73°N).



Figure 4.23 : Evolution du couvert nuageux au cours d'une année (moyenne mensuelle)

On note un profil similaire pour les villes de Paris et Quito, avec respectivement 70 et 73% du rayonnement direct intercepté par les nuages au cours d'une année, un minimum de 56 et 54% en aout et un maximum de 82 et 85% en mars et en février. À Montréal, seuls 32% du rayonnement direct par temps clair est intercepté par les nuages au cours d'une année, avec un minimum de 13% en février et de 42% en avril.

La Figure 4.24 illustre pour ces trois villes la distribution des températures de ciel moyenne du 1<sup>er</sup> janvier au 21 mars et du 21 juin au 21 septembre. La température et l'humidité relative moyennes sont renseignées sur la figure.



On note une distribution des températures de ciel relativement similaire à Paris et Montréal en été, avec des températures respectives de -8 et -5°C au zénith et de 18.5°C à l'horizon. Les écarts sont plus prononcés en hiver, avec notamment -46°C au zénith et -8°C à l'horizon à Montréal, respectivement - 23 et 5°C à Paris. Du 1<sup>er</sup> janvier au 21 mars à Quito, la température de ciel est de -4°C au zénith et de 13.5°C à l'horizon. Les écarts sont plus importants du 21 juin au 21 septembre, avec -14°C au zénith et de 14°C à l'horizon.

Ce résultat montre la variabilité de la distribution des températures sur la voûte céleste au cours d'une année et sous différents climats. On peut supposer au vu de la Figure 4.24 que l'impact de l'anisotropie de la voûte céleste est plus important en hiver qu'en été à Montréal, globalement plus important à Montréal qu'à Quito.

Nous identifions dans le chapitre précédent les directions de la voûte céleste les plus favorables à l'accès à l'éclairage naturel dans un intérieur pour un climat solaire donné. Au vu de ces résultats, certaines directions apparaissent plus favorables que d'autres au rafraîchissement des surfaces extérieures en période chaude et/ou à la limite des pertes de chaleur en période froide. Afin de valider cette hypothèse, nous comparons dans les paragraphes suivant l'évolution des températures de surfaces extérieures et des besoins en chauffage et en rafraîchissement à Paris en considérant un ciel isotrope et anisotrope.

## 4.6 Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le bilan thermique de l'enveloppe des bâtiments

La distribution des températures sur la voûte céleste varie donc au cours de l'année, avec des températures plus froides au zénith et des écarts dépendants de l'importance du couvert nuageux. La radiance *GLO* de la voûte céleste est globalement plus importante pour des angles zénithaux importants, avec une frontière entre 42 et 52° au-delà de laquelle elle est supérieure à la radiance moyenne de la voûte céleste. La Figure 4.25 illustre cette disparité ; elle représente l'évolution des flux *GLO* directionnel  $\varphi_{dir}$  et isotrope  $\varphi_{iso}$  reçus de la voûte céleste par une paroi verticale en fonction du couvert nuageux. La période sélectionnée s'étend du 10 au 24 janvier et présente une alternance entre journées couvertes et dégagées.





 $\varphi_{iso}$  est obtenu suivant l'Équation 4.43, avec  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>] la constante de Stefan-Boltzmann,  $\varepsilon_{sky}$  l'émissivité globale de la voûte céleste (cf. § 4.3.1),  $T_a$  [K] la température de l'air extérieur et *SVF* le facteur de vue du ciel depuis la paroi :

$$\varphi_{iso} = \sigma \, \varepsilon_{sky} \, T_a^4 \, SVF$$
 Équation 4.43

 $\varphi_{dir}$  est obtenu suivant l'Équation 4.45, avec  $\varepsilon_{\theta}$  l'émissivité de la voûte céleste pour l'angle zénithal  $\theta$  (cf. § 4.3.2) et  $\theta_s$  l'angle entre la normale à la surface et la direction considérée. La voûte céleste est divisée en 500 tuiles d'angle solide  $\Omega = \frac{2\pi}{500}$  (cf. 3.2.1), dont l'émissivité est calculée en leur centre.

$$\varphi_{dir} = \sigma \, \frac{1}{\pi} \, T_a^4 \int_{2\pi} \varepsilon_\theta \cos(\theta_s) \, d\omega \qquad \qquad \acute{E}quation \, 4.44$$

$$\varphi_{dir} = \sigma \frac{1}{\pi} T_a^4 \sum \varepsilon_{\theta} \cos(\theta_s) \Omega$$
 Équation 4.45

Le rayonnement *GLO* de la voûte céleste incident sur une paroi verticale au cours d'une année à Paris est de 1 403 kWh/m<sup>2</sup> pour un ciel isotrope et de 1 514 kWh/m<sup>2</sup> pour un rayonnement directionnel ; soit une différence de 111 kWh/m<sup>2</sup>. Le rayonnement atmosphérique incident sur la paroi est globalement supérieur de 7.5 % en considérant la voûte céleste anisotrope. L'écart moyen est de 12.6 W/m<sup>2</sup>, avec de fortes variations et un écart minimal de 1.3 W/m<sup>2</sup> par temps couvert et maximal de 25.5 W/m<sup>2</sup> par temps dégagé.

Pour une inclinaison de 45°, le rayonnement *GLO* de la voûte céleste est de 2 398 kWh/m<sup>2</sup> pour un ciel isotrope contre 2 451 kWh/m<sup>2</sup> en considérant un flux directionnel ; soit une différence de près de 53 kWh/m<sup>2</sup>, représentant 2% du rayonnement atmosphérique global incident sur la paroi.

A titre comparatif une paroi verticale orientée Sud reçoit au cours d'une année 730 kWh/m<sup>2</sup>, une paroi Nord 253 kWh/m<sup>2</sup>. La différence entre le rayonnement atmosphérique incident sur une paroi verticale en considérant la voûte céleste isotrope et anisotrope représente donc respectivement 15% et 44% du rayonnement *CLO* incident sur une paroi Sud et Nord.

Soit un bâtiment de base rectangulaire de 25 par 10 m orientée Nord Sud, de toiture à deux pans inclinés à 45°, avec une hauteur sous plafond minimale de 3m (cf. Figure 4.26).



Figure 4.26. Bâtiment de base rectangulaire à 2 pans inclinés

La Figure 4.27 représente les flux *CLO* (rayonnement solaire direct et diffus) et *GLO* (rayonnement atmosphérique) de la voûte céleste considérée isotrope et anisotrope. Le rayonnement atmosphérique est globalement plus de deux fois supérieure aux flux *CLO* incidents sur les différentes parois du bâtiment.



Figure 4.27. Flux CLO (gauche) et GLO de la voûte céleste isotrope (centre) et anisotrope (droite)

Le bâtiment est supposé vide et inoccupé ; on néglige toutes formes d'apports internes et la capacité thermique intérieure est celle du volume d'air intérieur. Les parois verticales, le plancher et la toiture sont composés de 20 cm de béton isolés par l'extérieur de 10 cm de PES revêtus de 2 cm de plâtre (cf. § 4.2.4.2). L'émissivité des surfaces extérieures est fixée à 0.9, leur coefficient de réflexion *CLO* à 0.5. On considère un taux de vitrage uniforme de 30%, les fenêtres ont une conductivité thermique  $U_w$  de 1.6 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> et un facteur solaire *fs* de 0.75 correspondants à un double vitrage classique. Le taux d'infiltration est fixé à 0.25 vol/h ; aucun système de ventilation mécanique n'est considéré. La température intérieure est maintenue entre 18 et 27°C. L'évolution des températures de l'air intérieur et des surfaces extérieures est estimée suivant le modèle décrit au § 4.2.4.3.

La Figure 4.28 représente l'évolution du bilan des échanges *GLO* entre la voûte céleste et la façade Nord du bâtiment en considérant un ciel isotrope  $\Delta \varphi_{iso}$  (Équation 4.46) et anisotrope  $\Delta \varphi_{dir}$  (Équation 4.47).

$\Delta \varphi_{iso} = \varepsilon_s  \varphi_{iso} - \varphi_s$	Équation 4.46
$\Delta \varphi_{dir} = \varepsilon_s  \varphi_{dir} - \varphi_s$	Équation 4.47

 $\varphi_s$  [W/m<sup>2</sup>] représente le rayonnement *GLO* émis par la surface dans l'infrarouge lointain, obtenu suivant l'Équation 4.48 avec  $T_s$  [K] sa température de surface et  $\varepsilon_s$  son émissivité.



Figure 4.28 : Bilan des échanges GLO entre la voûte céleste et la façade Nord du bâtiment

L'énergie perdue au cours d'une année à Paris par la façade Nord du bâtiment par échanges *GLO* avec la voûte céleste est de 73 kWh/m<sup>2</sup> en la considérant anisotrope et de 164 kWh/m<sup>2</sup> en la considérant isotrope, soit une différence de près de 91 kWh/m<sup>2</sup>. Cette différence représente près de 75 % de l'énergie *CLO* absorbée par la façade Nord, 25 % de l'énergie *CLO* absorbée par la façade Sud.

La voûte céleste n'est cependant pas la seule source de rayonnement GLO ; le sol et les surfaces urbaines émettent également dans l'infrarouge lointain. Si l'on considère le sol à la température de l'air, dans un contexte dégagé le rayonnement GLO du sol sur une façade verticale est légèrement supérieur à celui de la voûte céleste à Paris. L'énergie GLO émise par le sol et absorbée par la façade Nord est de 1 466 kWh/m<sup>2</sup> contre 1 363 kWh/m<sup>2</sup> pour l'énergie GLO émise par la voûte céleste. La différence de 91 kWh/m<sup>2</sup> entre le bilan des échanges GLO entre la voûte céleste et la façade Nord apparaît donc négligeable sur le bilan global des échanges GLO entre la paroi et son environnement ; elle ne représente cependant que 6 % de l'énergie *GLO* absorbée reçue du sol et 7 % de celle reçue de la voûte céleste, soit seulement 3 % de l'énergie *GLO* totale absorbée par la paroi.

L'impact de l'anisotropie de la voûte céleste sur le bilan radiatif global d'une paroi est donc relativement faible. La Figure 4.29 illustre son impact sur l'évolution de la température de surface extérieure de la façade Nord.



Figure 4.29 : Evolution de la température de surface de la façade Nord du bâtiment en considérant un ciel isotrope (magenta) et anisotrope (rouge)

La différence de température de surface moyenne est de 0.5° quelle que soit l'orientation considérée, avec un écart maximal de 1°C. La demande en chauffage est réduite de 275 kWh en considérant la voûte céleste anisotrope ; soit une différence inférieure à 1.1 kWh/m<sup>2</sup>, représentant 1.4 % de la demande globale du bâtiment (de 80 kWh/m<sup>2</sup>).

L'énergie perdue par échanges GLO avec l'atmosphère est inférieure de 55% pour une paroi verticale en considérant un ciel anisotrope. Cette différence apparaît toutefois négligeable au regard de l'énergie GLO reçue par le sol et, dans un contexte dégagé et pour le cas d'étude proposé, l'impact de l'anisotropie de la voûte céleste apparaît négligeable sur le bilan thermique globale du bâtiment.

## 4.7 Analyse de l'impact de l'anisotropie du rayonnement atmosphérique sur le confort thermique extérieur

La température radiante moyenne  $T_{mrt}$  est une composante fondamentale du confort thermique extérieur. (Lindberg, 2008) proposent de l'estimer en modélisant les flux radiatifs dans six directions (vers le haut, vers le bas, dans les 4 directions cardinales) :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma \varepsilon_p}} \left( \alpha_p \sum_{1}^{6} \varphi_{SW_i} F_i + \varepsilon_p \sum_{1}^{6} \varphi_{LW_i} F_i \right)$$
 Équation 4.49

Avec  $\alpha_p$  le coefficient d'absorption *CLO* du corps humain ;  $\varepsilon_p$  son émissivité ;  $\varphi_{CLO_i}$  et  $\varphi_{GLO_i}$  les flux *CLO* et *GLO* reçus dans la direction i ;  $F_i$  le "facteur d'absorption angulaire".

 $\alpha_p$  et  $\varepsilon_p$ sont respectivement fixés à 0.7 à 0.97 tels que proposés par (Lindberg, 2008). Les facteurs  $F_i$  pondèrent les flux en fonction de leur direction d'origine ; le corps humain étant plus exposé aux flux horizontaux que verticaux, on retient comme (Lindberg, 2008) une valeur de  $F_i$  de 0.22 dans les directions cardinales et de 0.06 vers le zénith et le nadir.  $\varphi_{CLO_i}$  et  $\varphi_{GLO_i}$  sont estimés suivant les méthodes décrites dans les paragraphes précédents (§ 3.2 et 4.3).

L'émissivité du ciel est supérieure à son émissivité globale pour de faibles hauteurs zénithales et inversement, avec une frontière située entre 42 et 52°; le flux *GLO* de la voûte céleste est donc plus important pour des rayons horizontaux. Le corps humain est plus exposé à ces derniers et la  $T_{mrt}$  est donc plus importante en considérant le rayonnement atmosphérique anisotrope dans un contexte dégagé. La Figure 4.30 représente l'évolution de la  $T_{mrt}$  en considérant la voûte céleste anisotrope et isotrope.



Figure 4.30. Evolution de la  $T_{mrt}$  en considérant un ciel anisotrope (rouge) et isotrope (magenta) – contexte dégagé, Paris, du 10 au 25 Janvier

L'écart moyen au cours d'une année est de 2.2°C, avec un écart maximal de 5°C par ciel dégagé. De jour, le rayonnement CLO entraine une hausse importante de la  $T_{mrt}$  et l'impact du rayonnement atmosphérique est amoindri. La  $T_{mrt}$  est donc globalement supérieure en considérant le ciel anisotrope dans un contexte dégagé.

22/02/2018
Les températures de ciel sont inférieures à la température moyenne de la voûte céleste pour des hauteurs zénithales importantes et inversement. Si l'on cherche par exemple à favoriser le confort thermique extérieur en hiver, il est donc intéressant de se protéger du rayonnement atmosphérique dans la direction du zénith. On se place dans un parc extérieur ; une pergola 50 m de long pour 8 m de large est fixée à une hauteur de 6 m le long d'un cheminement piéton. La Figure 4.31 représente la distribution de la température radiante moyenne sous la pergola sur un plan horizontal de 25 par 10 m à une hauteur de 1.5 m, à Paris, le 11 février à 22h. Le sol et la pergola sont supposés à la température de l'air extérieur, avec une émissivité de 0.9. Pour la journée considérée, la  $T_{mrt}$  est dans ce cas sous-estimée de 5°C le long duc cheminement piéton sous la pergola et de 4°C à l'extérieur.



Figure 4.31. Distribution dans de la  $T_{mrt}$  pour un ciel anisotrope (gauche) et isotrope (droite) – contexte dégagé, avec protection horizontale à 9m de hauteur, Paris, le 11 février à 22h

Dans un contexte urbain, l'environnement radiatif est dominé par le rayonnement infrarouge des surfaces extérieures et l'impact du rayonnement atmosphérique sur la  $T_{mrt}$  est moins important. La Figure 4.32 représente la distribution de la  $T_{mrt}$  sur un plan horizontal à 1.5 m de hauteur dans la rue décrite § 3.5.3.



Figure 4.32. Distribution dans de la  $T_{mrt}$  pour un ciel anisotrope (gauche) et isotrope (droite) – contexte urbain, Paris, le 11 février à 22h

La  $T_{mrt}$  est supérieure de 1°C pour un ciel anisotrope ; l'écart est principalement dû à l'importance du rayonnement GLO à l'horizon, dans l'axe de la rue. Si l'on augmente la longueur de la rue, la visibilité

22/02/2018

de l'horizon diminue et la  $T_{mrt}$  obtenue en considérant un ciel anisotrope est légèrement inférieure à celle obtenue pour un ciel isotrope, avec des écarts inférieurs à 0.1°C pour une longueur de rue de 100 m.

Une nouvelle fois, la prise en compte de l'anisotropie de la voûte céleste entraine une différence considérable sur les flux GLO reçus de l'atmosphère par une surface verticale. Dans un contexte dégagé, la  $T_{mrt}$  est de ce fait sous-estimée de plus de 2°C en moyenne et jusqu'à 5 degré. Dans un contexte urbain, les écarts constatés sur le bilan des échanges GLO avec la voûte céleste sont négligeables au regard du rayonnement GLO reçu du sol et des surfaces extérieures.

Les surfaces extérieures sont supposées dans cet exemple à la température de l'air extérieur ; l'impact de l'anisotropie de l'émissivité de la voûte céleste sur leur température n'est pas pris en compte. Au vu de l'importance du rayonnement GLO du sol et des surfaces extérieures sur le bilan radiatif global des bâtiments et le confort thermique extérieur, il apparaît nécessaire d'estimer précisément leur température.

# 4.8 Vers une meilleure prise en compte des échanges GLO à l'échelle urbaine

(Evins, 2014) montre que considérer les surfaces extérieures à la température de l'air induit une erreur moyenne de plus de 2°C sur les températures de surfaces et de 18% sur les besoins en chauffage et en rafraîchissement. (Beckers, 2017) mettent en évidence l'impact du rayonnement solaire sur les températures de surfaces extérieures, avec des différences de 30°C entre les surfaces exposées au rayonnement direct et à l'ombre (cf. Figure 4.33). Il apparaît donc nécessaire de s'appuyer, pour l'estimation des températures de surface, sur un maillage similaire à celui retenu pour le calcul de l'éclairement et de l'irradiance des surfaces extérieures.



Figure 4.33. Thermographie d'une rue du petit Bayonne à 16h (Beckers, 2017, thermographie réalisée par Elena García Nevado)

La méthode nodale permet d'estimer la température de surface du sol et des différentes parois d'un bâtiment (cf. § 4.2.4). (Kämpf, 2007) ramènent l'ensemble des parois d'un bâtiment à un unique nœud de capacité thermique  $C_w$ , connecté d'une part au nœud « air intérieur » et d'autre part à l'air extérieur (cf. Figure 4.34). Les échanges GLO sont pris en compte par le biais d'une unique température de surface extérieure  $T_{se}$ , correspondant à la température agrégée des différentes parois du bâtiment. Cette méthode permet de ramener le bâtiment à un modèle d'ordre deux, et ainsi de limiter les coûts d'implantation et les durées de calculs.



Figure 4.34. Schéma analogique d'un bâtiment suivant un modèle à 'deux nœuds'

(Walter, 2015) proposent une adaptation de ce modèle permettant d'une part d'obtenir des températures de surface différenciées pour chacune des parois du bâtiment et d'autre part de prendre en compte des températures différentes de celle de l'air extérieur pour le sol et les combles (cf. Figure 4.35). L'ensemble des parois verticales sont associées à une unique capacité thermique  $C_w$ ; le plancher et la toiture sont chacun associé à une capacité thermique, respectivement  $C_{w_a}$  et  $C_{w_c}$ .



Figure 4.35. Schéma analogique d'un bâtiment suivant un modèle à 'quatre nœuds'

Il est possible à partir de ce modèle de subdiviser chaque paroi en autant de branche que désirées, et donc de s'appuyer sur le maillage défini pour le calcul de l'éclairement et de l'irradiance des surfaces extérieurs (cf. Figure 4.36).



Figure 4.36. Schéma analogique du modèle à 'quatre nœuds' avec subdivision des parois

Le modèle proposé permet de simuler la thermographie des surfaces extérieures. Son implantation dépasse le cadre de cette thèse ; les résultats présentés dans ce chapitre montrent cependant son intérêt pour l'évaluation du confort thermique extérieur et du bilan radiatif de l'enveloppe des bâtiments.

### 4.9 Caractérisation de l'environnement radiatif extérieur

Du point de vue des transferts radiatifs, l'efficacité énergétique des bâtiments est conditionnée (1) par leur capacité à capter le rayonnement CLO en période froide et inversement à s'en protéger en période chaude ; (2) par la capacité de leur enveloppe à se rafraîchir par rayonnement GLO en période chaude et à stocker la chaleur en période froide.

### 4.9.1 Distribution de l'énergie sur la voûte céleste

Le ciel est source de rayonnement CLO (rayonnement solaire direct et diffus) et GLO (rayonnement atmosphérique). Le modèle de (Perez, 1993) permet d'estimer la distribution de la luminance sur la voûte céleste, l'intensité lumineuse du rayonnement diffus dans une direction donnée (cf. § 3.2.3). Il est par ailleurs communément utilisé pour estimer la distribution de la radiance dans les CLO, l'intensité énergétique du rayonnement de CLO dans une direction donnée. La luminance diffuse  $Lv(\zeta, \gamma)$  [lux.sr<sup>-1</sup>] de la voûte céleste dans une direction donnée, caractérisée par son angle zénithal  $\zeta$  et son angle avec la direction du Soleil  $\gamma$ , est obtenue à partir de sa luminance relative  $lv(\zeta, \gamma)$  et de l'éclairement diffus sur un plan horizontal  $Ed_h$  [lux] (cf. Équation 3.13). La radiance diffuse dans les

CLO  $R_{dif}(\zeta, \gamma)$  [W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>] est obtenue de façon analogue en remplaçant l'éclairement par l'irradiance diffuse sur un plan horizontal  $I_{dh}$  [W.m<sup>-2</sup>] :

$$R_{dif}(\zeta,\gamma) = Id_h \frac{lv(\zeta,\gamma)}{\int_{\omega \in 2\pi} \cos(\zeta) \ lv(\zeta,\gamma) \ d\omega}$$
 Équation 4.50

La radiance CLO directe  $R_{dir}(\theta_z, \gamma_z)$  [W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>] d'un élément différentiel d'angle solide  $d\omega$  dans la direction du Soleil, d'angle zénithale  $\theta_z$  et d'azimut  $\gamma_z$ , est obtenue à partir de l'équation suivante avec  $Ib_n$  [W.m<sup>-2</sup>]:

$$R_{dir}(\theta_z, \gamma_z) = \frac{lb_n}{d\omega}$$
 Équation 4.51

La Figure 3.20, § 3.5.1, illustre l'impact du couvert nuageux sur la distribution de la luminance, l'intensité lumineuse dans une direction donnée, sur la voûte céleste ; la Figure 4.37 illustre son impact sur la distribution de la radiance CLO et GLO. Le ciel est divisé en 500 tuiles. On utilise la projection équivalente de (Lambert, 1970), telle que décrite par (Beckers, 2014a, p.104), afin de conserver les surfaces de chacune d'elles.



Figure 4.37. Radiance CLO (en haut) et GLO (en bas) de la voûte céleste à Paris (48.73°N) pour un ciel (de gauche à droite) dégagé, couvert clair, couvert sombre – les 17, 1<sup>er</sup> et 26 juin à 13h.

La radiance CLO dans la direction du Soleil est très supérieure aux radiances diffuse et GLO de la voûte céleste ; pour une meilleure lisibilité des résultats, le maximum de l'échelle de visualisation est fixé à 235 W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>, correspondant à la radiance diffuse maximale pour les 3 journées considérées. La radiance de la tuile de ciel dans la direction du Soleil est renseignée directement sur la figure. On remarque que cette dernière atteint 404 W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup> pour un ciel couvert sombre. Ceci s'explique par le fait que l'irradiance directe normale ne vaut pas tout à fait 0 mais 4 W/m<sup>2</sup> au pas de temps considéré ; ramenée à l'angle solide d'une tuile de ciel (0.0126 sr pour une partition en 500 tuiles), on obtient bien une radiance directe de 318 W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>, soit une radiance totale (directe + diffuse) de 404 W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>.

#### 4.9.2 Identification des directions à privilégier pour capter le rayonnement CLO

Le rayonnement CLO pénétrant à l'intérieur d'un bâtiment est absorbé par les parois et les meubles intérieurs puis restitué au volume d'air intérieur ; il constitue un apport énergétique qui limite les besoins en chauffage et inversement augmente les besoins en rafraîchissement. La Figure 4.38 représente la distribution de la radiance CLO globale (directe + diffuse) cumulée [Wh.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>] sur la voûte céleste à Paris, du solstice d'été à l'équinoxe du printemps et du solstice d'hiver à l'équinoxe d'automne. Les trajets solaires aux solstices et aux équinoxes sont représentés par des traits blancs. Le ciel est divisé en 500 tuiles. On utilise la projection équivalente de (Lambert, 1970), telle que décrite par (Beckers, 2014a, p.104), afin de conserver les surfaces de chacune d'elles. On considère un pas de temps de quinze minutes.



Figure 4.38. Radiance CLO cumulée de la voûte céleste Paris, du 21 décembre au 21 mars (à gauche) et du 21 juin au 21 septembre (à droite)

L'énergie est concentrée le long des trajets solaires quelle que soit la période considérée ; du 21 décembre au 21 mars à Paris, la radiance cumulée est jusqu'à plus de 15 fois supérieure sur la moitié Sud que sur la moitié Nord de l'hémisphère.

La radiance cumulée d'une source de rayonnement permet d'évaluer les apports solaires potentiels dans une direction donnée ; elle permet d'identifier les directions à privilégier pour capter l'énergie solaire.

Dans un contexte dégagé, une orientation Sud apparaît, comme on pouvait s'y attendre, nettement favorable à la limite des besoins en chauffage à Paris. Elle peut par ailleurs entrainer un risque de surchauffe en été. La température de l'air extérieur y est inférieure à 18°C plus de 7000 heures par an et supérieure à 26°C seulement près d'une centaine d'heure par an ; on privilégie la 'stratégie du chaud' et donc une orientation Sud.

Dans un contexte urbain, la voûte céleste est en partie masquée par les surfaces extérieures qui absorbent une partie du rayonnement CLO les atteignant et en réfléchissent le reste. La radiance  $R_s$  [W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>] d'une surface dépend de son irradiance  $I_s$  et de son absorbance  $\alpha_s$ , sa capacité à absorber le rayonnement CLO (cf. Équation 4.52) ; le calcul de l'irradiance des surfaces extérieures permet d'estimer leur radiance cumulée sur une période donnée et ainsi d'évaluer les apports solaires potentiels dans leur direction.

$$R_s = \frac{(1 - \alpha_s) I_s}{\pi}$$
 Équation 4.52

La modélisation de l'ensoleillement des surfaces extérieures permet donc au MOE-U d'identifier dès le plan masse les orientations à privilégier afin de maximiser les apports solaires en période froide et inversement de s'en protéger en période chaude.

# 4.9.3 Identification des directions les plus favorables au confort thermique et au rafraîchissement des surfaces extérieures

La  $T_{mrt}$  est définie comme la température uniforme d'une enceinte fictive englobant le corps humain dont les transferts radiatifs avec ce-dernier sont équivalents à ses transferts radiatifs avec son environnement (cf. §4.2.1). En d'autres termes, la  $T_{mrt}$  représente la température du corps humain à l'équilibre radiatif avec son environnement, en négligeant les transferts par convection, évapotranspiration et conduction. Elle caractérise l'impact global sur le confort thermique des sources de rayonnement de courtes et grandes longueurs d'ondes, mais ne permet pas d'identifier celles qui lui nuisent ou le favorisent en un point donné.

Soit une source quelconque de rayonnement, de radiances  $R_{CLO}$  dans les courtes longueurs d'ondes et  $R_{GLO}$  dans les grandes longueurs d'ondes. Afin de caractériser son impact sur le confort thermique, nous proposons un nouvel indicateur : sa *température radiante*  $T_{rad}$  [°C], définie comme la température atteinte à l'équilibre radiatif par un élément de surface différentiel exposé à un hémisphère de radiances CLO et GLO uniformes et équivalentes à celle de la source considérée, en négligeant transferts thermiques par convection, évapotranspiration et conduction. Elle est obtenue suivant l'Équation 4.53.

$$T_{rad} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sigma \varepsilon_p} \left( \alpha_p \, \pi \, R_{CLO} + \varepsilon_p \, \pi \, R_{GLO} \right)} - 273.15 \qquad \text{Équation 4.53}$$

Avec  $\alpha_p$  l'absorbance du corps humain et  $\varepsilon_p$  son émissivité, traduisant respectivement sa capacité à absorber le rayonnement de CLO et GLO.

Les paragraphes précédents mettent en évidence la disparité de la distribution sur la voûte céleste de la radiance dans les courtes et grandes longueurs d'ondes, notamment du fait de la couverture nuageuse ; les différentes tuiles de ciel issues de notre partition de cette dernière ont donc un impact très différent sur le confort thermique. La Figure 4.39 représentent la température radiante de la voûte céleste pour une partition en 500 tuiles pour différents types de ciel.



Figure 4.39. Température radiante de la voûte céleste à Paris (48.73°N) pour un ciel (de gauche à droite) dégagé, couvert clair, couvert sombre – les 17, 1<sup>er</sup> et 26 juin à 13h.

La température radiante de chaque tuile est calculée à partir des radiances dans les CLO et GLO en leur centre :

$$T_{rad}(\theta,\gamma) = \sqrt[4]{\frac{\alpha_p \pi R_{CLO}(\theta,\gamma)}{\sigma \varepsilon_p} + \left(T_{sky,\theta} + 273.15\right)^4} - 273.15 \qquad \text{Équation 4.54}$$

La radiance dans les grandes longueurs d'ondes  $R_{GLO}(\theta)$  [W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>] de la voûte céleste à une hauteur zénithale  $\theta$  est estimée à partir de sa température de ciel dans la direction correspondante  $T_{sky,\theta}$  [°C]:

$$R_{GLO}(\theta) = \frac{\sigma \left(T_{sky,\theta} + 273.15\right)^4}{\pi}$$
 Équation 4.55

La radiance dans les courtes longueurs d'ondes  $R_{CLO}(\theta, \gamma)$  [W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>] pour un angle zénithal  $\theta$  et un azimut  $\gamma$  donnés est obtenue par la somme des radiances diffuse (cf. Équation 4.50) et directe (cf. Équation 4.51).

La température radiante dans la direction du Soleil est une nouvelle fois très supérieure à celle du reste de la voûte céleste et le maximum de l'échelle retenu correspond la température radiante maximale en ne considérant que les radiances diffuse et dans les GLO. La température radiante dans la direction du Soleil est renseignée directement sur la figure.

Pour un ciel dégagé, la température radiante de la tuile dans la direction du Soleil atteint 1000°C. Celle des tuiles de la zone circumsolaire sont comprises entre 40 et 75°C, entre 41 et 48°C à l'horizon. Le reste de la voûte céleste présente des températures radiantes inférieures à 30°C, avec un minimum de 7°C. On déduit de ces observations que l'exposition à la voûte céleste pour un ciel dégagé, dès lors que la zone circumsolaire et l'horizon sont masqués, a un impact positif sur la température radiante moyenne ; la température atteinte à l'équilibre radiatif étant inférieure à 30°C.

Pour un ciel couvert clair, la tuile de ciel dans la direction du Soleil atteint 213°C. Le reste de la voûte céleste a une température radiante comprise entre 40 et 70°C, avec un gradient entre l'horizon et la direction su Soleil. On note un comportement similaire pour un ciel couvert sombre avec un gradient moins prononcé et des températures comprises entre 33 et 45°C, à l'exception de la tuile dans la direction du Soleil qui atteint 107°C. On déduit de ces observations que, dans ces deux cas, l'exposition au rayonnement de courtes et grandes l'ondes de la voûte céleste est systématiquement pénalisante pour le confort thermique extérieur.



La Figure 4.40 représente la distribution sur la voûte céleste de la température radiante moyenne du 21 décembre au 21 mars, du 21 juin au 21 septembre et au cours d'une année.

Figure 4.40. Température radiante moyenne de la voûte céleste à Paris (48.73°N) (de gauche à droite) du 21 décembre au 21 mars / du 21 juin au 21 septembre / toute l'année.

Du 21 décembre au 21 mars, la température radiante moyenne est de -12.5°C au zénith et inférieure à zéro pour une hauteur zénithale supérieure à 40°, de l'ordre de 11°C à l'horizon et atteignant 13°C le long des trajets solaires. Du 21 juin au 21 septembre, elle est de 10.6°C au zénith, supérieure à 20°C pour une hauteur zénithale inférieure à 40° et atteint 33.3°C le long des trajets solaires.

L'analyse de la distribution sur la voûte céleste de sa température radiante moyenne permet d'identifier, pour une période donnée, les directions entrainant le rafraîchissement ou le réchauffement du corps humain ; elle permet d'identifier les directions les plus favorables au confort thermique extérieur. Au vu de la figure précédente, le potentiel de rafraîchissement par rayonnement GLO est limité à Paris du 21 juin au 21 septembre ; du 21 décembre au 21 mars, le ciel est glacial pour des hauteurs zénithales supérieures à 40°, avec un gradient du zénith vers l'horizon, et sa visibilité entraine le rafraîchissement du corps humain.

La température radiante dépend de la capacité du corps à absorber le rayonnement CLO et GLO et permet d'analyser à un pas de temps ou sur une période donnés les directions qui favorisent ou nuisent le confort thermique. Dans la même logique, il est possible d'évaluer l'impact d'une source de rayonnement sur le réchauffement et le rafraîchissement d'une surface extérieure en estimant sa température radiante à partir de son absorbance  $\alpha_{fac}$  et de son émissivité  $\varepsilon_{fac}$ . La Figure 4.41 représente à titre d'exemple la distribution sur la voûte céleste de la température radiante moyenne pour différents ciel pour un revêtement en béton brut, d'absorbance  $\alpha = 0.6$  et d'émissivité  $\varepsilon = 0.91$ , et en plâtre, d'absorbance  $\alpha = 0.1$  et d'émissivité  $\varepsilon = 0.9$ .



Figure 4.41. Température radiante moyenne de la voûte céleste Paris (48.73°N), du 21 décembre au 21 mars / du 21 juin au 21 septembre / toute l'année.

Les températures radiantes calculées pour le plâtre sont nettement inférieures à celles calculées pour le béton et l'impact du rayonnement CLO moindre du fait de sa faible absorbance ; l'impact de l'exposition à la voûte céleste est très différent sur les températures de surfaces obtenues pour ces deux revêtements.

La température radiante ne prend en compte que les transferts radiatifs et néglige notamment les transferts par convection et évapotranspiration, ainsi que la capacité à stocker l'énergie de la paroi ; il est donc impossible d'estimer directement à partir de cet indicateur les températures effectives des différentes surfaces extérieures. Elle permet cependant, pour une nature de matériaux donnée, d'évaluer l'impact d'une source de rayonnement sur sa température de surface, et ainsi d'identifier les directions les plus favorables au rafraîchissement ou la limite des pertes de chaleur par rayonnement des surfaces extérieures en fonction de leur revêtement.

### **4.10 Conclusions**

Le rayonnement atmosphérique représente plus de deux fois le rayonnement *CLO* incident sur les surfaces extérieures. Ces dernières émettent un rayonnement dans l'infrarouge lointain. Leur bilan radiatif *GLO* est généralement négatif et leur exposition à la voûte céleste entraine leur rafraîchissement ; ce qui permet d'une part de limiter les surchauffes en période chaude et cause d'autre part une hausse des besoins en chauffage et des problèmes de condensation et de moisissure en période froide.

La radiance *GLO* de la voûte céleste, qui peut être caractérisée par sa température de ciel ou son émissivité, dépend de la hauteur zénithale. Nous avons défini dans ce chapitre un modèle permettant d'estimer sa distribution sur la voûte céleste. Le modèle proposé permet de reproduire le comportement observé pour des ciels uniformément couverts ou dégagés. Pour des ciels intermédiaires, le manque de données ne permet pas d'analyser les résultats obtenus. Au vu des écarts observés pour un ciel dégagé, il apparaît toutefois raisonnable de préférer la distribution de la radiance *GLO* obtenue suivant ce modèle à une distribution isotrope quelle que soit l'importance du couvert nuageux.

Le modèle proposé est basé sur les travaux de (Bliss, 1961), qui propose une formulation de l'émissivité directionnelle de la voûte céleste en fonction de son émissivité globale, de l'angle zénithal de la direction considérée et d'une constante *b*. Nous avons montré que le recours à un paramètre *b* variable permet de conserver l'énergie totale émise par la voûte céleste sur un plan horizontal. Nous avons ainsi mis en évidence une frontière pour un angle zénithal compris entre 42 et 52° en fonction du couvert nuageux au-delà duquel les températures de ciel sont supérieures à la température moyenne de la voûte céleste.

Nous avons mis en évidence la variabilité de la distribution de la radiance *GLO* au cours d'une année et pour différents climats ; la différence de température entre le zénith et l'horizon, par exemple, est en moyenne de 40°C en hiver et de 20°C en été à Montréal, et seulement de 10°C à Quito entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 21 mars.

Le rayonnement atmosphérique est communément considéré isotrope lors de la réalisation du bilan thermique des bâtiments. Nous avons montré que cette hypothèse entraine une différence moyenne de 12.6 W/m<sup>2</sup> et maximale de 25.5 W/m<sup>2</sup> sur le flux *GLO* incident sur une paroi verticale à Paris; soit une erreur de plus de 90 kWh/m<sup>2</sup> dans son bilan radiatif *GLO*, représentant respectivement plus de 75% de l'énergie *CLO* absorbée par une surface orientée Nord et 25 % de celle absorbée par une surface Sud. Cette différence ne représente cependant que 7% du rayonnement atmosphérique et 3% du rayonnement *GLO* global absorbés. Son impact sur le bilan thermique global des bâtiments apparaît négligeable pour le cas d'étude proposé ; elle entraine une différence de l'ordre de 1 kWh/m<sub>SPL</sub><sup>2</sup> sur le besoin en chauffage, avec une différence de température de surface moyenne de 0.5°C et maximale de 1°C pour les parois verticales.

Son impact sur le confort thermique extérieur est plus important, avec notamment des différences de plus de 5°C sur la  $T_{mrt}$  à Paris dans un contexte dégagé. L'analyse de la distribution de la  $T_{mrt}$  sur un plan à hauteur de 1.5 m dans une rue typique d'un quartier haussmannien a toutefois montré que son impact est limité dans un contexte urbain, où l'environnement radiatif est dominé par le rayonnement *GLO* des surfaces extérieures.

Ce-dernier constat nous a conduits à proposer une méthode nodale s'appuyant sur un maillage de dimensions identiques à celui retenu pour le calcul de l'ensoleillement extérieur. L'implantation d'un tel modèle dépasse le cadre de cette thèse. Il apparaît cependant nécessaire pour la caractérisation de l'environnement radiatif extérieur et l'évaluation de son impact sur le confort thermique extérieur, le potentiel de rafraîchissement et la capacité à stocker la chaleur de l'enveloppe des bâtiments.

Nous avons finalement introduit le concept de *température radiante* d'une source de rayonnement, la température atteinte à l'équilibre radiatif par un élément de surface différentiel exposé à un hémisphère de radiances CLO et GLO uniformes et équivalentes à celle de la source considérée. L'analyse de sa distribution sur les différentes surfaces de l'environnement urbain et sur la voûte céleste permet d'évaluer l'impact de ces sources de rayonnement sur le confort thermique et le rafraîchissement des surfaces par transferts radiatifs. Il permet ainsi de guider le MOE-U au moment de la définition de la géométrie et des revêtements extérieurs d'un projet d'aménagement urbain.

## 5 Conclusions générales

L'objectif principal de cette thèse est de donner des pistes pour une meilleure évaluation du bioclimatisme d'un projet urbain dès le plan masse. A cette étape, le manque de données empêche une analyse fine des aspects thermiques et lumineux. Nous avons d'abord proposé de contourner cette difficulté en nous appuyant sur une BDD propre à la zone climatique du projet. Il est en effet possible d'estimer à partir de l'usage, du standard de performance et de la typologie de structure des bâtiments (1) l'ensemble des attributs nécessaires à la réalisation de STD (composition des parois, scénario occupation, puissance et modulation des équipements mobiliers et de l'éclairage, etc.) et (2) les facteurs de vue de l'extérieur sur les zones d'intérêts au regard de l'éclairage naturel. Le MOE-U peut donc à partir de ces trois paramètres construire dès le plan masse une maquette numérique contenant l'information sémantique nécessaire à l'évaluation de l'accès à la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments, de leur efficacité énergétique et du confort thermique des espaces extérieures.

La BDD proposée permet de définir pour un usage donné les luminances minimale L<sub>min</sub> et maximale Lmax d'une source de lumière extérieure : pour un bâtiment de bureaux, les luminances au-delà desquelles elle entraine un éclairement respectivement supérieur à 300 lux, seuil de perception retenu pour une activité de lecture et d'écriture, et 2000 lux, synonyme de risque d'éblouissement. Nous avons introduit dans le deuxième chapitre de cette thèse les concepts de luminances suffisante (SL), utile (UL) et excessive (EL), définies comme la part des heures diurnes d'une année pour laquelle la luminance L d'une source extérieure entraine respectivement un éclairement (1) suffisant ( $L > L_{max}$ ), (2) utile  $(L_{min} < L < L_{max})$ , et (3) susceptible de causer un éblouissement  $(L > L_{max})$ . Ces trois indicateurs établissent un lien entre l'environnement lumineux extérieur et l'éclairage naturel à l'intérieur des bâtiments. Ils permettent notamment d'estimer la part d'une année pour laquelle les sources de lumières extérieures (1) permettent seules d'atteindre un éclairement suffisant sur les zones de premier et second rang ; (2) entrainent un risque d'éblouissement. L'impact du choix des revêtements intérieurs et des protections solaires sur le DA<sub>300</sub> s'est révélé tel qu'il apparaît difficile de l'estimer dès l'étape du plan masse. L'analyse de la distribution de ces trois indicateurs sur les surfaces extérieures et la voûte céleste permet cependant d'identifier les orientations à privilégier pour favoriser l'accès à la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments. Nous avons finalement mis en évidence la variabilité de la distribution sur la voûte céleste des luminances suffisantes, utiles et excessives à Quito, Montréal et Paris. Nous avons ainsi montré par exemple que (1) le ciel permet à Quito un éclairement suffisant près de 75% de l'année quelle que soit la direction considérée, jusqu'à 97% de l'année à horizon ; (2) à Montréal il ne permet un éclairement suffisant que 42% au Nord de l'hémisphère pour une hauteur zénithale importante contre 85% de l'année au Sud de l'hémisphère et à l'horizon ; (3) à Paris, la majeure partie de la voûte céleste permet un éclairement suffisant près de 70% de l'année.

La BDD proposée permet la STD des bâtiments du projet et donc d'évaluer leur efficacité énergétique et le confort thermique extérieur dès le plan masse. Le rayonnement atmosphérique joue un rôle majeur dans le comportement thermique des surfaces extérieures. Afin de permettre une meilleure prise en compte de ce-dernier, nous avons défini dans le troisième et dernier chapitre de cette thèse un modèle pour la distribution des températures de ciel en fonction du couvert nuageux. Le modèle proposé permet d'obtenir le comportement observé pour un ciel dégagé et uniformément couvert, et il nous semble raisonnable de préférer ce modèle à une distribution uniforme de l'émissivité sur la voûte céleste. Nous avons analysé la distribution des températures de ciel à Quito, Montréal et Paris et ainsi mis en évidence sa variabilité en fonction du climat local. Nous avons montré que la prise en compte de l'anisotropie de la voûte céleste entraine (1) des écarts de 91 kWh/m<sup>2</sup> sur le bilan radiatif *GLO* des parois verticales d'un bâtiment à Paris, soit 25 % de l'énergie *CLO* absorbée par une façade Sud ; (2) des variations de 5°C de la température radiante moyenne dans un contexte dégagé. Son impact sur le bilan thermique des bâtiments et le confort thermique extérieur dans un contexte urbain

apparaît toutefois limité, notamment du fait de l'importance relative du rayonnement *GLO* émis par les surfaces extérieures. Nous avons donc proposé un modèle thermique s'appuyant sur un maillage de la géométrie extérieure du projet afin d'obtenir des températures de surfaces différenciées en fonction de leur exposition aux flux radiatifs. Nous avons finalement introduit la notion de température radiante d'une source de rayonnement, qui permet d'évaluer son impact sur le rafraîchissement du corps humain et des surfaces extérieures en fonction de leur nature. L'analyse de leur distribution sur les surfaces extérieures et la voûte céleste permet d'identifier les orientations et la nature des revêtements extérieurs à privilégier pour favoriser le confort thermique des espaces extérieurs, le rafraîchissement et le réchauffement des bâtiments en période chaude et froide.

Ces travaux ont pour objet l'analyse des transferts radiatifs et de leurs impacts sur le bioclimatisme de l'urbain. De nombreux aspects n'ont de ce fait pas été analysés, notamment l'influence des vents, de la végétation et des précipitations. De même, les flux de chaleur latents, notamment les phénomènes de condensation et d'évapotranspiration, ont été négligés, ainsi que bien des sources d'erreur (vieillissement des matériaux, résistances thermiques de contact, etc.).

Les indicateurs et modèles proposés permettent d'évaluer l'environnement radiatif extérieur au regard notamment de l'accès à la lumière naturelle et du confort thermique extérieur. Le but final de ce travail est leur implantation dans un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) destinés aux MOE-U afin de les guider dans leur recherche de formes urbaines efficaces et assurant le confort et l'accès à la lumière naturelle de leurs occupants.

### 6 Perspectives

La BDD proposée dans le premier chapitre de cette thèse a été établie dans le cadre du projet SERVEAU, dans un contexte français. Les *zones climatiques* et *standards de performances* retenus sont propres au territoire métropolitain, mais la méthodologie et l'architecture retenues sont généralisables et peuvent être utilisés quel que soit le territoire étudié.

Le niveau de détail de la géométrie doit permettre un compromis entre durée de saisie, coûts et précisions des calculs. Le MOE-U définit à l'étape du plan masse les volumes englobants les différents bâtiments d'un projet sous forme de prismes droits ; les contours d'un bâtiment peuvent être différents à chaque étage ; le type de toiture, notamment son inclinaison, a un impact majeur sur l'ensoleillement des surfaces extérieures et doit donc être pris en compte. Sur base de ces trois constats, nous avons proposé de recourir à des typologies paramétriques simples, permettant de construire rapidement les différents bâtiments du projet et du cadre bâti existant. Ces typologies ne sont pas exhaustives et devront être complétées, notamment pour permettre l'application de toitures inclinées sur des bâtiments en 'L' et en 'T'. D'autres pistes peuvent également être envisagées, notamment les méthodes procédurales, qui permettent de construire de façon semi-automatique un certain nombre de détails géométriques suivant une « procédure » prédéfinie.

Le maillage de la géométrie est une étape importante de la modélisation des flux radiatifs. Ce thème est abordé de façon relativement succincte dans le deuxième chapitre de cette thèse. Nous avons proposé d'utiliser un maillage par *carreaux de Coons* qui présente deux avantages majeurs : sa simplicité d'implantation et l'obtention d'un maillage structuré et conforme. Ce type de maillage permet de représenter les triangles et quadrilatères qui constituent plus de 90% des surfaces urbaines, et nous apparait donc particulièrement adapté à la représentation de la ville. Il est par ailleurs compatible avec la méthode des éléments finis et ouvre donc la porte à une comparaison entre cette dernière et le modèle reposant sur l'analogie thermique électrique proposé en s'appuyant sur un maillage identique de la géométrie.

Le recours à une modèle de bâtiment d'ordre deux s'appuyant sur un maillage des surfaces extérieures permettrait de simuler des thermographies extérieures pour un moindre coût de calcul. Il permettrait ainsi au MOE-U de tester plusieurs configurations d'aménagement en une journée de travail, avec un objectif de durée de modélisations inférieures à 5 minutes pour une centaine de bâtiments. L'approche proposée doit être comparée à des modèles plus complets, reposant éventuellement sur la méthode des éléments finis, et des thermographies d'environnements urbains.

Le modèle proposé pour la distribution des températures de ciel devra être confronté à des thermographies de la voûte céleste afin de permettre une meilleure compréhension du rayonnement atmosphérique en fonction du type de couvert nuageux.

Les flux radiatifs lumineux et énergétiques ont été modélisés suivant la méthode de la radiosité, basée sur le calcul des facteurs de vue. Les réflexions spéculaires ne peuvent pas être directement prises en compte suivant cette méthode. Différentes solutions existent pour leur considération, notamment le recours à des *facteurs de vues étendus*, tels que définis par (Sillon, 1989). Ces-derniers permettent pour un faible coût de calcul de prendre en compte à la fois les réflexions diffuses et spéculaires et nous apparaissent comme une piste à explorer.

### 7 Références

(Angström, 1915) Anders Angstrom, "A study of the radiation of the atmosphere. Based upon observations of the nocturnal radiation during expeditions to Algeria and to California", Smithsonian Institution, vol. 65 n°3, 1915

(Arab, 2004) Nadia Arab, "L'activité de projet dans l'aménagement urbain : processus d'élaboration et modes de pilotage : Les cas de la ligne B du tramway strasbourgeois et d'Odysseum à Montpellier", Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Décembre 2004.

(Aliaga, 2012) Daniel G. Aliaga, "*Geometrical Models of the City*" in "*Solar Energy at Urban Scale*" (book), Wiley-ISTE, Chapter 9, p. 191-204, May 2012.

(Argiriou, 1992) Athanassios A. Argiriou, Mat Santamouris, Constantinos Balaras, Sheldon Jeter, *"Potential of radiative cooling in southern Europe"*, International Journal of Solar Energy, vol. 13, p. 189-203, January 1992.

(Awanou, 1998) Cossi Norbert Awanou, "*Clear sky emissivity as a function of the zenith direction*", Renewable Energy, vol. 13 n°2, P. 227-248, February 1998.

(ASHRAE, 2001) American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, "ASHRAE Fundamentals Handbook" (SI Edition), ISBN: 1883413885, 2001

(Beckers, 2009) Benoit Beckers, "Geometrical interpretation of sky light in architecture projects". Proceedings of CISBAT 2009, EPFL, Lausanne, Suisse, 2<sup>nd</sup> – 3<sup>rd</sup> September 2009.

(Beckers, 2010) Benoit Beckers, Pierre Beckers, *"Les anomalies, l'équation de Kepler, la position du soleil"*, Rapport Heliodon, <u>www.heliodon.net</u>, 2010.

(Beckers, 2012) Benoit Beckers, "Solar Energy at Urban Scale", Book, Wiley-ISTE, 384 pages, May 2012.

(Beckers, 2014a) Benoit Beckers, Pierre Beckers, *"Reconciliation of Geometry and Perception in Radiation Physics"*, Book, Wiley-ISTE., 192 pages, July 2014.

(Beckers, 2014b) Benoit Beckers, Pierre Beckers, "Sky vault partition for computing daylight availability and shortwave energy budget on an urban scale", Lighting Research and Technology, vol. 46 n°. 6, p. 716-728, December 2014.

(Beckers, 2017) Benoit Beckers, José Pedro Aguerre, Gonzalo Besuievsky, Eduardo Fernández, Elena García Nevado, Christian Laborderie, Raphaël Nahon, *"Visualizing the infrared response of an urban canyon throughout a sunny day"*, Med Green Forum 4 (Mediterranean Green Buildings and Renewable Energy Forum), Florence, Italy, 31<sup>st</sup> July – 2<sup>nd</sup> August 2017.

(Berdhal, 1982) Paul Berdhal, Richard Fromberg, *"The thermal radiance of clear skies"*, Solar Energy, vol. 29 n°4, p. 299-314, 1982.

(Berger, 2003) Xavier Berger, Joseph Bathiebo, "Directional spectral emissivities of clear skies", Renewable Energy, vol. 28, p. 1925–1933, 2003.

(Butti, 1980) Ken Butti, John Perlin "Golden Thread: 2500 Years of Solar Architecture and Technology", Book, Cheshire Books, 290 pages, June 1980.

(Bliss, 1961) Raymond W. Bliss Jr., "Atmospheric radiation near the surface of the ground", Solar Energy, vol.5 n°.3, p. 103-120, September 1961.

(Coccolo, 2016) Silvia Coccolo, Jérôme Kämpf, Jean-Louis Scartezzini, David Pearlmutter, "*Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards*", Urban Climate vol. 18, 33–57, 2016.

(Campbell, 1998) Gaylon S. Campbell, John M. Norman, "An Introduction to Environmental Biophysics", Book, Springer, New York, 1998.

(Capeluto, 2012) Guedi Capeluto, "Dense Cities in Temperate Climates: Solar and Daylight Rights" in "Solar Energy at Urban Scale" (book), Wiley-ISTE, Chapter 13, p. 291-310, May 2012.

(Chauvel, 1982) Chauvel, P., Collins, J.B., Dogniaux, R., Longmore, J., "*Glare from windows: current view of the problem*", Lighting Research Technology, vol. 14, p. 31–46, 1982.

(Clark, 1981) Gene Clark, "*Passive/hybrid comfort cooling by thermal radiation*", Proceedings of the international passive and hybrid cooling conference, Miami Beach, p. 682–714, 1981.

(Crawley, 1999) Drury B. Crawley, Jon W. Hand, Linda K. Lawrie, *"Improving the Weather Information Available to Simulation Programs"*, Proceedings of Building Simulation '99, vol. 2, Sixth International IBPSA Conference, Kyoto, September 1999.

(Crawley, 2000) Drury B. Crawley, Linda K. Lawrie, Curtis O. Pedersen, Frederick C. Winkelmann, "EnergyPlus: Energy Simulation Program", ASHRAE Journal, vol. 42, p. 49-56, 2000.

(Devillers, 1994) Christian Devillers, *"Le projet urbain"*, Livre, Éditions du Pavillon de l'Arsenal, Paris, 1994.

(Dollfus, 1954) Jean Dollfus, *"Les aspects de l'architecture Populaire dans le monde"*, Livre, Albert Morancé, Paris, 30 pages, 1954.

(Duffie, 2013) John A. Duffie, William A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes", Book, 4<sup>th</sup> ed., WILEY, 936 pages, May 2013.

(Einhord, 1979) H.D. Einhord, "*Discomfort glare: a formula to bridge differences*", Lighting Research Technology, vol. 11, p. 90–94, 1979.

(Elsasser, 1942) Walter M. Elsasser, *"Heat transfer by infrared radiation in the atmosphere"*, Harvard Meteorological Studies, vol. 6, Harvard University, Blue Hill Meteorological Observatory, Milton, Massachusetts, June 1942.

(Evins, 2014) Ralph Evins, Viktor Dorer, Jan Carmeliet, "Simulating external longwave radiation exchange for buildings", Energy and Buildings, vol. 75, p. 472–482, 2014.

(Foley, 2009) John D. Foley, Andries Van Dam, Steven K. Feiner, John F. Hughes, "*Computer Graphics, principles and practice*" (book, 2<sup>nd</sup> ed.), Addison-Wesley, 2009.

(Givoni, 2011) Baruch Givoni, Indoor temperature reduction by passive cooling systems, Solar Energy, vol. 85 P. 1692–1726, 2011.

(Hopkinson, 1972) Ralph Galbraith Hopkinson, "*Glare from daylighting in buildings*", Applied Ergonomics vol. 3, p. 206–215, 1972.

(Huang, 2014) Jianxiang Huang, Jose Guillermo Cedeño-Laurent, John D. Spengler, "*CityComfort+: A simulation-based method for predicting mean radiant temperature in dense urban areas*", Building and Environment, vol. 80, p. 84–95, 2014.

(Ihm, 2009) Pyonchan Ihm, Abderrezek Nemri, Moncef Krarti, *"Estimation of lighting energy savings from daylighting"*, Building and Environment, volo. 44, p. 509–514, 2009.

(Ingallina, 2010) Patrizia Ingallina, "*Le projet urbain*", Livre, Presses universitaire de France, Paris, Que sais-je? 2001, 4<sup>éme</sup> édition, 128 pages, 2010.

(Iwata, 1990) Toshie Iwata, Ken-Ichi Kimura, Masanori Shukuya, Kyosuke Takano, "*Discomfort caused by wide-source glare*", Energy and Buildings, vol. 15, p. 391–398, 1990.

(Kämpf, 2007) Jérôme Kämpf, Darren Robinson, "A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows", Energy and Buildings, vol. 39 n°4, p. 445–453, April 2007.

(Kondratyev, 1956) Kirill Y. Kondratyev, "Radiant Heal Exchange in the Atmosphere" (in Russian), Book, Hydrometeorological Publishing House, Leningrad, 1956. Note: A translation of this book has been published by PERGAMON PRESS LTD. in 1965.

(Kramer, 2015) Rick Kramer, Jos van Schijndel, Henk Schellen, "Simplified thermal and hygric building models: A literature review", Frontiers of Architectural Research 1, p.318–325, 2012.

(Kruczek, 2015) Tadeusz Kruczek, "Use of infrared camera in energy diagnostics of the objects placed in open air space in particular at non-isothermal sky", Energy, vol. 91, p. 35–47, November 2015.

(Laret, 1981) Louis Laret, "Contribution au développement de modèles mathématiques du comportement thermique transitoire de structures d'habitation", Thèse de doctorat, Université de Liège, 1981.

(Le Monde, 2017) Julien Bouissou, *"En Inde, des projets urbains gérés par des manageurs"*, Le Monde, mai 2017.

(Lorenz, 1982) Francis Lorenz, Gabrielle Masy, "Méthode d'évaluation de l'économie d'énergie apportée par l'intermittence de chauffage dans les bâtiments. Traitements par différences finies d'un modèle à deux constantes de temps", Rapport Technique, Laboratoire de Physique du Bâtiment, Université de Liège, Janvier 1982.

(Lindberg, 2008) Fredrik Lindberg, Björn Holmer, Sofia Thorsson, "SOLWEIG 1.0--modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings", International Journal of Biometeorology, vol. 52, p. 697–713, 2008.

(Motamed, 2015) Ali Motamed, Laurent Deschamps, Jean-Louis Scartezzini, "Validation and preliminary experiments of embedded discomfort glare assessment through a novel HDR vision sensor". Proceedings of CISBAT 2015, p. 235–240, EPFL, Lausanne, Suisse, 9–11 September 2015.

(Miguet, 2000) Francis Miguet, "*Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*", Thèse de doctorat, Ecole d'Architecture de Nantes, 2000.

(Midler, 1993) Christophe Midler, *"L'auto qui n'existait pas - Management des projets et transformation de l'entreprise"*, Livre, Dunod, 216 pages, 1993.

(Nabil, 2005) Azza Nabil, John Mardaljevic, "Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings", Lighting Research & Technology vol. 37, p. 41–59, 2005.

(Nahon, 2013) Raphaël Nahon, Thibaut Vermeulen, Benoit Beckers, "An Adaptive 3D Model for Solar Optimization at the Urban Scale", Smart and Sustainable City 2013 (ICSSC 2013), IET International Conference, Shanghai, China, 19–20 August 2013.

(Nahon, 2015) Raphaël Nahon, Gonzalo Besuievsky, Eduardo Fernández, Benoit Beckers, Olivier Blanpain, *"Exploring metrics on the evaluation of the bioclimatic potential at early stages of urban project"*, Proceedings of CISBAT 2015, p. 883–888, EPFL, Lausanne, Suisse, 9–11 September 2015.

(Nahon, 2016) Raphaël Nahon, Olivier Blanpain, Benoit Beckers, "Impact of the anisotropy of the sky vault emissivity on the building envelope radiative budget", Proceedings of FICUP 2016, p. 188–198, Quito – Galápagos, Ecuador, 26-30 September 2016.

(Nahon, 2017) Raphaël Nahon, Benoit Beckers, Olivier Blanpain, "*Exploring metrics on the evaluation of the bioclimatic potential at early stages of urban project*", European Journal of Environmental and Civil Engineering, accepted in February 2017. (<u>http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2017.1304279</u>)

(Nazarian, 2017) Negin Nazariana, Jipeng Fana, Tiffany Sinc, Leslie Norfordd, Jan Kleissla, "*Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: A 3D numerical model for standard effective temperature*". Urban Climate, accepted in April 2017. (<u>http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.011</u>)

(Ng, 2012) Edward Ng, "Dense Cities in the Tropical Zone" in "Solar Energy at Urban Scale" (book), Wiley-ISTE, Chapter 12, p. 259-290, May 2012.

(Ngendakumana, 1988) Philippe Ngendakumana, "*Modélisation simplifiée du comportement thermique d'un bâtiment et vérification expérimentale*", Thèse de doctorat, Université de Liège, 1988.

(Nouvel, 2015) R. Nouvel, R. Kaden, J-M. Bahu, J. Kaempf, P. Cipriano, M. Lauster, J. Benner, E. Munoz, O. Tournaire, E. Casper, "*Genesis of the CityGML Energy ADE*", Proceedings of CISBAT 2015, p. 931–936, EPFL, Lausanne, Suisse, 9–11 September 2015.

(OGC, 2012) Open Geospatial Consortium, "OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard", Version 2.0, Editors: Gerhard Gröger, Thomas H. Kolbe, Claus Nagel, Karl-Heinz Häfele, 2012.

(Olgyay, 1962) Victor Olgyay, Aladar Olgyay, "*Design with climate – Bioclimatic approach to architectural regionalism*" (book), Princeton university press, 191 pages, 1962.

(Paule, 2015) Bernard Alain Paule, Jérôme Boutillier, Samuel Pantet, *"Shading device control: effective impact on daylight contribution"*, Proceedings of CISBAT 2015, p. 241–246, EPFL, Lausanne, Switzerland, 9–11 September 2015.

(Perez, 1990) Richard Perez, Pierre Ineichen, Robert Seals, Joseph Michalsky, Ronald Stewart, *"Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance"*, Solar Energy, vol. 44 n°5, p. 271–289, 1990.

(Perez, 1993) Richard Perez, Robert Seals, Joseph Michalsky, "All-weather model for sky luminance distribution—preliminary configuration and validation", Solar Energy, vol. 50 n°3, p. 235–245.

(Petherbridge, 1950) P. Petherbridge, Ralph Galbraith Hopkinson, "Discomfort glare and the lighting of buildings", Lighting Research Technology, vol. 15 n°2, p. 39–79, 1950.

(Reinhart, 2000) Christoph F. Reinhart, Sebastian Herkel, "Simulation of annual daylight illuminance distributions - a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods", Energy and Buildings, vol. 32 n°2, p. 167–187, 2000.

(Reinhart, 2006) Christoph F. Reinhart, John Mardaljevic, Zack Rogers, "Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design", LEUKOS, vol. 3 n°1, p. 1–25, 2006.

(Reinhart, 2011) Christoph F. Reinhart, Jan Wienold, "*The daylighting dashboard - A simulation-based design analysis for daylit spaces*", Building and Environment, vol. 46, p. 386–396, 2011.

(Reinhart, 2013) Christoph F. Reinhart, Timur Dogan, J. Alstan Jakubiec, Tarek Rakha and Andrew Sang, *"UMI - An urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability"*, Proceedings of BS2013 (Building Simulation 2013), Chambery, France, 26–28 August 2013

(Robinson, 2005) Darren Robinson, Andrew Stone, "A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange", Building Services Engineering Research & Technology vol. 26, n°4 p. 271–284, 2005.

(Roche, 2000) Roche, L., Dewey, E., Littlefair, P., "Occupant reactions to daylight in offices", Lighting Research Technology, vol. 32, p. 119–126, 2000.

(Roche, 2002) Roche, L., "Summertime performance of an automated lighting and blinds control system", Lighting Research Technology, vol. 34, p. 11–27, 2002.

(Sillon, 1989) Francois Sillion, Claude Puech "A General Two-Pass Method Integrating Specular and Diffuse Reflection", Computer Graphics, vol. 23, n° 3, p. 335–344, July 1989.

(Shi, 2011) Zhiyang Shi, Xiong Zhang, "Analyzing the effect of the longwave emissivity and solar reflectance of building envelopes on energy-saving in buildings in various climates", Solar Energy, vol. 85, p. 28–37, 2011.

(Spencer, 1971) Spencer, J.W., *"Fourier series representation of the position of the sun"*, Search, vol. 2 n°5, May 1971.

(Tang 2004) Runsheng Tang, Y. Etzion, I.A. Meir, "*Estimates of clear night sky emissivity in the Negev Highlands, Israel*", Energy Conversion and Management, vol. 45 n°11-12, p. 1831–1843, July 2004.

(Tardieu, 2015) Charlotte Tardieu, *"Transition énergétique dans les projets urbains : conditions de mise en œuvre"*, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, Mars 2015.

(Tregenza, 2011) Peter Tregenza, Michael Wilson, "Daylighting: Architecture and Lighting Design" (book), Routledge, 304 pages, 2011.

(U.N., 2014) Department of Economic and Social Affairs, Population Division, "World Urbanization Prospects: The 2014 Revision", CD-ROM Edition, June 2014.

(Vermeulen, 2013) Thibaut Vermeulen, Jérôme Henri Kämpf, Benoit Beckers, "Urban Form Optimization for the Energy Performance of Buildings Using Citysim", Proceedings of CISBAT, EPFL, Lausanne, Switzerland, 4–6 September 2013.

(Walter, 2015) Emmanuel Walter, Jérôme Henri Kämpf, "A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values", Proceedings of the 2nd BSA conference, p. 215–222, Building Simulation Applications BSA 2015, Bozen-Bolzano, Italy,  $4^{th} - 6^{th}$  February 2015.

(Ward, 1994) Gregory J. Ward, *"The RADIANCE lighting simulation rendering system"*, Proceedings of '94 SIGGRAPH conference, p. 459–72, Orlando, July 1994.

(Wienold, 2006) Jan Wienold, Jens Christoffersen, "Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras", Energy and Buildings vol. 38, p. 743–757, 2006.

(Young, 1994) Young, A.T., "Air mass and refraction", Applied Optics, vol.33, p. 1108–1110, 1994.

(Zienkiewicz, 1971) Zienkiewicz, O., "The Finite Element Method in Engineering Science", Book, McGraw-Hill, 521 pages, 1971.